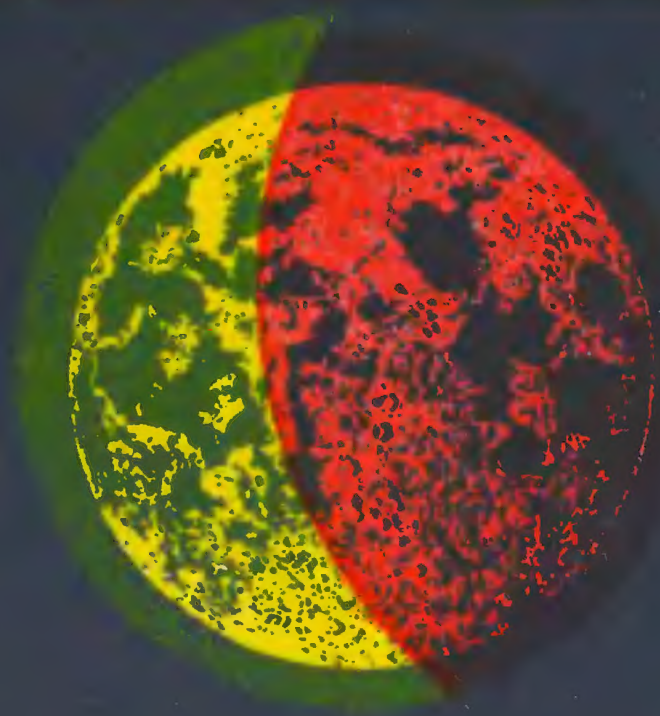


VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



М. М. Дагаев

СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

М. М. Дагаев

СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1978

ПРЕДИСЛОВИЕ

Солнечные и лунные затмения принадлежат к интереснейшим явлениям природы и происходят сравнительно часто. Однако наблюдаются они далеко не из всех мест земной поверхности, и поэтому у лиц, недостаточно знакомых с астрономией, возникает суждение о редкости обоих явлений, в особенности солнечных затмений. Иногда даже можно услышать, что затмения Солнца и Луны наступают внезапно и предсказать их заранее невозможно. Такое мнение крайне ошибочно: даже в глубокой древности, когда причины затмений не были известны, умели предсказывать затмения по обнаруженной периодичности их повторения. Теперь же причины затмений и условия их наступления настолько хорошо изучены, что можно заранее с высокой точностью предвычислять эти явления на сотни лет вперед, т. е. безошибочно устанавливать не только даты, но и все обстоятельства каждого затмения для различных мест земной поверхности.

В ближайшие годы на территории Советского Союза будет видно несколько затмений, и коль скоро они всегда вызывают неизменный интерес у любителей астрономии, то полезно популярно рассказать о причинах и условиях видимости затмений, а также о простейших их наблюдениях, чему и посвящена эта небольшая книга. Но в истории человечества имеется много любопытных фактов, так или иначе связанных с затмениями, особенно с солнечными, и вполне естественно, что некоторые из них в книге упомянуты.

Многие любители астрономии ныне уже не удовлетворяются только описательным изложением

сущности явлений, а имеют законное желание самостоятельно провести вычисления обстоятельств затмений. Поэтому уровень и стиль изложения, принятые в данной книге, не однородны. Подавляющее большинство разделов книги изложено популярно, с привлечением немногих простейших формул, призванных лишь подтвердить приводимые числовые сведения. Но разделы 9, 10 и 11, предназначенные для вычислений обстоятельств затмений, содержат специальные понятия (впрочем, объясненные) и математические выкладки и поэтому доступны лишь лицам, владеющим математическими знаниями в объеме средней школы. Из-за необходимости ссылок на формулы этих разделов многие из них перенумерованы обозначением раздела и порядковым номером; так, нумерация (9.2) означает вторую формулу раздела 9, а нумерация (10.16) — 16-ю формулу раздела 10.

Но даже лицам, не желающим проводить вычислений обстоятельств затмений, все же полезно ознакомиться с разделом 9, содержащим ряд основных астрономических понятий. Тот, кто не захочет читать этот раздел, может спокойно его пропустить и сразу перейти к разделу 12, в котором содержатся сведения о ближайших солнечных и лунных затмениях, видимых на территории СССР. Общее правильное представление о причинах и обстоятельствах затмений даже в этом случае нарушено не будет.

Автор приносит свою глубокую благодарность Э. В. Кононовичу за ряд ценных указаний, существенно улучшивших содержание данной книги.

ВВЕДЕНИЕ

В очень далекие времена, около 6000 лет назад, народы, населявшие обширные равнины вдоль великих рек Египта, Китая, Индии и Месопотамии, достигли в своем развитии высокой самобытной культуры. Теплый климат и плодородная почва, орошаемая многоводными реками, позволяли выращивать обильные урожаи земледельческих культур, а на тучных пастбищах разводить стада домашних животных. В этих обширных равнинах создавались поселения, жители которых занимались не только земледелием и животноводством, но и различными видами ремесла. Возникновение частной собственности на средства производства привело к появлению имущих классов, рост благосостояния которых приводил к превращению наиболее крупных поселений в города и на их основе постепенно возникали сначала небольшие, а затем и обширные государства. В погоне за богатством и даровой рабочей силой правящие классы проводили военные набеги на соседние племена, грабили их и обращали в рабство, заставляя рабов безвозмездно трудиться под палящими солнечными лучами на сельских полях и городских стройках. В рабство обращалась и та часть неимущего населения, которая была не в состоянии выплачивать налоги, устанавливаемые правителями городов и государств. История говорит о том, что все ранние государства, возникшие в долинах рек Нила, Хуан и Янцзы, Инда, Ганга и Брахмапутры, Тигра и Евфрата, были рабовладельческими.

Свободные от тяжелого физического труда представители имущих классов и их окружение имели

полную возможность заниматься развитием культуры и искусства, создавать силами рабов знаменитые сооружения — храмы, дворцы, усыпальницы, известные ныне как выдающиеся памятники древнего мира. Они же вели наблюдения над явлениями природы, пока еще примитивные, но все же наблюдения, которые с появлением простейшей письменности фиксировались в летописях и, накапливаясь веками, составили впоследствии фундамент зарождавшихся наук, и одной из первых среди них была астрономия, наука о небесных светилах и явлениях.

Заниматься наблюдениями природных явлений человечество заставила жизненная необходимость. Люди давно поняли, что их жизнь зависит от Солнца. С его восходом ночная тьма и прохлада сменялись теплым утром, а когда Солнце поднималось в небо высоко, становилось нестерпимо жарко, и все живое в природе стремилось укрыться в тень от его палящих лучей; неукрывшихся же иногда поражала смерть от тепловых и солнечных ударов. Под живительными лучами Солнца природа оживала и произрастали богатейшие урожаи посеянных людьми злаков, но во времена засухи то же Солнце уничтожало посевы, огромный труд людей пропадал даром и наступал голод. Летний зной сменялся периодами длительных дождей, Солнце, скрытое облаками, подолгу не показывалось на небе, становилось сыро и настолько холодно, что временами выпадал снег. Вполне естественно, что буквально все древние народы создавали культ Солнца и поклонялись ему, считали его главным божеством, от воли которого зависит их жизнь.

Но бывало и так, что в ясный солнечный день вдруг поднимался сильный ветер, чистое небо внезапно покрывалось черными тучами, в небе сверкали молнии, гремел гром, и на землю обрушивались потоки дождя. Изредка молнии ударяли в деревья или в строения, разрушая или сжигая их, а порой убивали людей и животных. Страх и бессилие перед явлениями природы создавали в сознании людей представления о многих грозных небожителях — богах, воздействующих на человечество и карающих его за действия и поступки, неугодные богам. Оставалось

одно — приносить жертвы богам, дабы их умиловать, искупить вину за проступки или отблагодарить за благодеяния. Организацией и выполнением жертвоприношений занимались представители правящих классов — служители культа или жрецы, превратившиеся со временем в замкнутую касту и передававшие по наследству из рода в род свои наблюдения над явлениями природы и культа их обожествления.

Жрецы объявляли себя представителями и служителями богов, занимались врачеванием, вершили суд и расправу, назначали дни празднеств, массовых поклонений и жертвоприношений богам и строго следили за выполнением установленных ими ритуалов, а непокорных предавали лютой смерти. Жрецы были крайне заинтересованы в установлении возможно большего числа празднеств с жертвоприношениями, поскольку предназначенные к этому дары поступали в распоряжение жрецов и обогащали их. Так постепенно, из века в век, утверждалась моральная власть служителей культа над трудящимися массами человеческого общества, помогавшая правящим классам держать их в повиновении. Из отдельных ритуальных празднеств, украшаемых примитивными, но красочными легендами, зарождались и развивались мифы о богах и исподволь складывались начатки религий, естественно, отличающихся у разных народов, но имеющих общую основу — непонимание и обожествление явлений природы, к тому же усугубленное гнетом правителей.

Выполняя свои обязанности, жрецы пытались обнаружить влияние неба на землю, найти связь небесных явлений с земными, подметить признаки, которыми боги одобряют или осуждают действия правителей, военачальников, жрецов, жителей отдельных поселений и даже целых государств, предвещают им успехи или неудачи и бедствия. Возникло целое учение о влиянии небесных светил на людские судьбы, получившее впоследствии в Древней Греции название астрологии, учение ложное, ненаучное, но тем не менее до сего времени процветающее во многих капиталистических странах и выродившееся в откровенное шарлатанство.

И все же именно жрецам-астрологам принадлежит несомненная заслуга в накоплении простейших астрономических знаний. Эти астрологи были и первыми астрономами, изучавшими звездное небо. А оно в южных странах просто великолепно! Там звездное небо сияет такой красотой и с таким блеском, которого жители северных стран, с их светлыми летними ночами, даже не представляют. На темном небе горят яркие звезды и кажется, будто бы они где-то рядом, совсем близко от Земли. Ночи длинные и теплые, воздух чист, прозрачен и спокоен, и поневоле возникает желание подолгу проводить наблюдения небесных светил.

Длительные наблюдения звездного неба и их обобщения привели к открытию ряда закономерностей в природе. Было обнаружено суточное вращение звездного неба, перемещение по нему Луны и строго периодическое изменение ее вида (смена лунных фаз), регулярно повторяющееся изменение вида звездного неба и годовое движение Солнца на фоне звезд, подмечена связь между видом звездного неба и сезонами года, в частности, наступлением разлива рек, увлажняющего обрабатываемые поля, что было особенно важно для выращивания обильного урожая. Производственная жизнь и развитие организационной и государственной структуры общества настоятельно требовали создания системы счета длительных промежутков времени, по которым можно было заранее предвидеть наступление сезонов года и связанных с ними сельскохозяйственных работ, устанавливать сроки взимания с населения налогов, назначать дни ритуальных праздников, фиксировать дни государственных и общественных событий и т. д. Такие системы счета длительных промежутков времени, известные под названием календарей, создавались во всех древних культурных государствах жрецами-астрологами и они же следили за согласованием календарей с явлениями природы.

Подмеченные в природе закономерности жрецы сохраняли в великой тайне и считали достоянием только своей касты. Даже разработанные ими календари не разглашались властителям и, тем более, народу. О предстоящем наступлении сезонов года, раз-

ливах рек, об очередной смене лунных фаз и даже о необходимости начала тех или иных сезонных видов полевых работ жрецы объявляли населению под видом воли богов. Непосвященные в жреческую касту не смели даже пытаться узнать основу мудрости жрецов: всех, кто пытался это сделать, ожидала жестокая кара смертью.

Безусловно, основные закономерности природы подмечались, а начальные астрономические сведения добывались и накапливались всеми народами, достигшими определенного уровня в своем развитии, в том числе славянскими и тюркскими племенами, но здесь мы останавливаемся на самых древних культурных государствах потому, что именно там были разработаны первые календари и созданы должности государственных астрономов-астрологов.

Основой всех календарей, независимо от их родины, всегда служили (как служат и до сих пор) хорошо заметные периодические астрономические явления природы — смена лунных фаз и смена сезонов года. Уже в середине третьего тысячелетия до нашей эры (н. э.) в древнемесопотамском государстве Шумере был создан первый лунный календарь, основанный на периодической смене лунных фаз, повторяющихся примерно через 29,5 суток. Поэтому в первом лунном календаре, или календарном годе, было 12 месяцев, содержащих поочередно по 30 и 29 суток. Тогда же была введена и семидневная неделя, каждый день которой посвящался одному из ярких перемещающихся по небу светил — Солнцу, Луне и пяти известным тогда планетам*). Лунный календарный год содержит 354 дня (иногда — 355 дней) и поэтому его начало смещается по всем сезонам естественного года, содержащего немногим более 365 суток. В последующие эпохи лунный календарь многократно совершенствовался, а некоторые его модификации и поныне действуют в ряде азиатских и африканских стран.

*) Видимые невооруженным глазом планеты Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн были известны всем древним культурным народам. Слово планета происходит от греческого «планетес» — блуждающая.

В Древнем Египте в третьем тысячелетии до н. э. применялся солнечный календарь, согласованный с сезонами года. Сопоставляя на протяжении многих десятилетий вид предутреннего звездного неба с днями наступления разливов реки Нила, египетские жрецы установили, что они наступают через несколько дней после первого утреннего (т. е. непосредственно перед восходом Солнца) появления самой яркой звезды неба. Эту звезду прозвали Изидой-Сотис*), т. е. слезой богини плодородия Изи-ды: по древнеегипетскому поверью слезы Изи-ды переполняли реки и вызывали их разлив. Между двумя последовательными первыми утренними появлениями этой звезды проходило около 360 суток и поэтому продолжительность первого древнеегипетского солнечного календаря составляла 360 дней (12 месяцев по 30 дней) и уже значительно позже увеличена до 365 суток, но пять последних дней года не включались в состав месяцев. Началом года считался день утреннего появления на небе звезды Изи-ды-Сотис и он приходился всегда на один и тот же сезон года.

В Древнем Китае в третьем тысячелетии до н. э. тоже был разработан лунный календарь, в который периодически включались дополнительные месяцы для его согласования с сезонами года, а впоследствии создавались и лунно-солнечные календари различных систем, основанные как на смене лунных фаз, так и на смене сезонов года. Подобные календари разрабатывались во многих древних государствах и их целью было вести счет по лунным фазам, но удерживать начало календарного года на определенном сезоне естественного солнечного года.

В Древнем Риме в VIII веке до н. э. календарный год состоял из 10 месяцев и содержал 304 дня, в VII веке до н. э. — из 12 месяцев общей длительностью в 355 суток, а чтобы новый календарный год всегда начинался весной, в календарь систематически вставлялся добавочный месяц, длительностью от 22 до 23 дней, и поэтому в разные годы календарь содержал от 355 до 378 суток. К тому же верховные

*) Теперь эта звезда называется Сириусом; это самая яркая звезда созвездия Большого Пса.

жрецы по своему усмотрению то удлиняли, то укорачивали продолжительность календарного года и наконец настолько запутали счет дней, что, по образному выражению выдающегося французского философа и просветителя Ф. Вольтера (1694—1778), «Римские полководцы всегда побеждали, но они никогда не знали, в какой день это происходило». Эту путаницу в древнеримском календаре ликвидировал диктатор Юлий Цезарь (100—44 г. до н. э.), который своим указом ввел с 1 января 45 г. до н. э. солнечный календарь, разработанный египетским астрономом Созигеном и ныне известный под названием юлианского календаря или старого стиля. Счет дней по этому календарю отстает в настоящее время на 13 суток от счета по современному европейскому календарю или новому стилю, введенному в 1582 г. в ряде европейских государств и значительно позже принятому во многих странах мира. В СССР новый стиль введен с 1 февраля 1918 г.

История календарей различных эпох и народов очень интересна, и мы настоятельно рекомендуем читателю превосходную книгу С. И. Селешникова «История календаря и хронология» (вышедшую третьим изданием в издательстве «Наука» в 1977 г.). Здесь же необходимо отметить, что, начиная с древнейших времен, разрабатывались и действовали разнообразные календари и в каждом из них за начало счета годов, называемого эрой, принимались самые различные как исторические, так и мифические (выдуманные) события, и даже в одном государстве не было единой эры. Так, в Древнем Египте летосчисление велось по годам правления фараонов, в государствах Древнего Китая — по династиям императоров и по эпохам их царствования, в Вавилонском царстве — по правлению царей и от даты воцарения Набонассара, в Древнем Риме — сначала по правлению консулов, затем — «от основания Рима» и, наконец, по императорам, а в древнегреческих государствах — по именам должностных лиц и по олимпийским играм (олимпиадам), которые на протяжении почти четырех столетий проводились один раз в четыре года. В еврейском календаре за начало летосчисления принят день мифического «сотворения мира»

(3671 г. до н. э.), а в Средневековой Греции и на Руси, после принятия христианства (988 г.), счет годов тоже исчислялся от «сотворения мира», но оно было отнесено к 5508 г. до н. э.

В летописях древних народов и в рукописных книгах древних ученых содержатся богатейшие сведения о возникновении, развитии и гибели различных государств, об их общественно-политическом строе, науке и культуре, об укладе жизни и обычаях народов, — словом, обо всем, что характеризует развитие человеческого общества и изучается наукой — историей. Многие эти сведения приведены в хронологической последовательности, с упоминанием дат или по крайней мере года по тем календарям, которые были приняты в те далекие времена. Но у разных народов в разные эпохи разрабатывались, применялись и сменяли друг друга самые разнообразные системы календарей с неравной продолжительностью месяцев и календарного года и с различным летосчислением, т. е. эрой. Совершенно очевидно, что при таком многообразии календарей и летосчислений просто невозможно установить последовательность исторического развития различных народов и государств. Необходимо было свести счет времени по прежним календарям к одной системе летосчисления, к системе современного европейского календаря, к нашей или новой эре.

Кстати, и сейчас далеко не во всех странах мира пользуются нашим европейским календарем. Уже упоминалось об использовании в ряде стран Азии и Африки лунного календаря, в котором простой календарный год состоит из 354 суток, а високосный — из 355 дней, так что за каждые 33 наших солнечных года проходит 34 лунных года. В современном Египте одновременно действуют три календаря — два солнечных и один лунный мусульманский. Один солнечный календарь — это европейский, с нашим летосчислением, а в другом эрой считается год воцарения римского императора Диоклетиана (284 г. н. э.), так что 1978 год в нашем летосчислении считается 1694 годом в эре Диоклетиана. В лунном же мусульманском календаре эрой считается год бегства Мухаммеда (Магомета) из Мекки в Медину (622 г. н. э.)

и поэтому, с учетом продолжительности лунного года, наш 1978 год считается 1397 годом *). С марта 1976 г. в Иране для солнечного календаря принята эра коронации древнеперсидского царя Кира (558 г. до н. э.) и, таким образом, с марта 1978 г. в Иране начался 2537 год, но параллельно действует и лунный мусульманский календарь.

Там, где параллельно действует несколько летосчислений, переход от одного к другому и установление дат исторических событий по принятому календарю не представляет больших затруднений. Так, например, завоевание римлянами древнегреческих государств-городов отмечалось по календарям обоих народов, и поэтому, зная структуру этих календарей, можно найти соответствие между их различными эрами. Но современной науке требуются даты древних событий не по прежним различным и давно отслужившим календарям, а по ныне действующему европейскому летосчислению, введенному менее 1500 лет назад, так как принятый сейчас счет годов начался только с 533 г. Путем длительного, скрупулезного и многократного изучения и сопоставления древних книг, летописей и календарей, историки все же сумели решить эту задачу для многих давно прошедших событий, но точность решения была невелика и часто ограничена десятилетиями, а иногда и веками. Вот если бы даты хотя бы нескольких событий, упомянутых в древних летописях, можно было непосредственно указать по нашему календарю! Тогда решение задачи значительно облегчается, так как сразу устанавливается связь между новым летосчислением и теми календарями, по которым зафиксированы события. И в середине прошлого, XIX в., на помощь историкам пришли астрономы.

1. ЗАТМЕНИЯ И СУЕВЕРИЯ

Ясный солнечный день. Солнце сияет в голубом небе, посылая на Землю свои живительные лучи. Как и всегда, жизнь природы течет обычным порядком

*) $(1978 - 622) \cdot \frac{34}{33} = 1356 \cdot 1,0303 = 1397.$

и люди заняты своим повседневным трудом, не обращая внимания на привычное дневное светило. И вдруг среди бела дня происходит что-то необъяснимое. Сначала замечается какое-то странное небольшое ослабление солнечного света. Может быть, облако набежало на Солнце? Нет, небо абсолютно чистое, да и когда облако набегает на Солнце, то на земной поверхности видна движущаяся тень, а ее как раз и нет. Но солнечный свет явно ослабевает, и тогда, взглянув на Солнце, люди видят, как на него справа надвигается что-то черное, и оно имеет не привычный круглый, а серпообразный вид, как стареющая Луна. Вот уже от Солнца остается узенький яркий серпик, его лучи уже почти не согревают, становится прохладно. Еще несколько мгновений и над земной поверхностью с невероятной быстротой проносится странная гигантская тень. Солнце совсем исчезает и становится темно, как в темные сумерки. День внезапно превратился в ночь, на потемневшем небе появляются яркие звезды, а на месте Солнца виден черный круг, окруженный растрепанным серебристым сиянием — солнечной короной (рис. 1). Наступило полное солнечное затмение. Может быть, сияние в небе короны вокруг Солнца подсказало в дальнейшем людям изображать богов и «святых» тоже с сиянием вокруг головы?

В далекие от нас времена солнечные затмения вызывали у людей суеверный ужас. Не зная причин затмений, невежественные люди дорисовывали наблюдаемую картину своим воображением. Одни полагали, что солнечные затмения представляют собой особые знамения, которыми боги выражают свой гнев, вызванный неблагоприятными поступками народов, целых государств или их правителей, и предрекают многие несчастья — голод, разорение, нападение сильных и жестоких врагов, потоп, массовые болезни, вымирание и другие тяжелые невзгоды или даже конец мира. Другие видели в этом явлении нападение на Солнце огромного чудовища — дракона, пытающегося сожрать небесное светило. Малодушные в панике разбегались, стремясь укрыться от солнечного затмения и гнева богов, а более храбрые, стремясь спасти Солнце от дракона, быстро вооружались под-

ручными средствами — бубнами, барабанами, кастрюлями, сковородками, луками со стрелами, копьями и камнями, словом, всем тем, что сразу попадалось



Рис 1 Полное солнечное затмение

под руку, и, подняв невообразимый шум, метали стрелы, копья и камни в чудовище. И к радости своей скоро обнаруживали, как из-за черной круглой заслонки на небе снова появляется узкий солнечный серп, исчезают звезды и лучистое сияние, быстро

светлеет и наконец Солнце снова принимает свой обычный вид. С радостью люди расходились по своим делам, довольные тем, что спасли Солнце от несчастья. И если через много лет опять повторялось солнечное затмение, то, имея уже опыт в «спасении» Солнца, снова прибегали к тем же действиям.

В древних крупных централизованных государствах, при их правителях, были придворные жрецы-астрологи, которые были обязаны вести наблюдения за небом и по расположению светил предсказывать наступление небесных явлений, благоприятствующих или препятствующих жизни государства и действиям правителей. С астрологами обязательно советовались перед принятием важных государственных решений, и горе было тому астрологу, который неверно предсказывал исход предполагаемых действий. Вполне понятно, что хорошо изученные периодические явления астрологи предсказывали правильно и заслуживали похвалы своих повелителей, но остальные их предсказания и советы были всегда туманны и неопределенны.

В этом отношении современным астрологам и колдунам, еще сохранившимся в некоторых капиталистических и малоразвитых странах, значительно легче. В январе 1977 г. в одной небольшой африканской деревушке все жители от мала до велика два дня подряд, с раннего утра и до позднего вечера, танцевали и пели под удары барабанов-там-тамов. По указанию местного колдуна они просили у духов дождя, которого давно не было, и урожая грозила гибель. На третий день вынужденного веселья хлынул тропический ливень. Конечно, жители деревушки были этим необычайно обрадованы, а колдун — больше всех потому, что его не подвела местная метеорологическая станция, за три дня до этого передавшая по радио сообщение о предстоящих дождях. Современные колдуны и астрологи полностью используют науку в своих корыстных целях, как это делали, по мере ее развития, служители культа всех эпох.

Древним астрологам-астрономам было значительно труднее выполнять свои обязанности, ведь в их распоряжении не было науки, а наоборот, их скрупу-

лезными наблюдениями природных явлений на протяжении веков закладывался лишь ее фундамент. И тем не менее астрологи обязаны были заранее предсказывать наступление земных и астрономических явлений, в том числе солнечных и лунных затмений. Особенно строгие требования к обязанностям астрономов предъявлялись в Древнем Китае, считавшемся его правителями центром Земли, «срединной империей». Между Небом и Землей признавалось согласие, гармония, и если она нарушалась, то Небо оповещало об этом особыми знаменами, о чем астрономы обязаны были заранее оповещать императора, дабы он смог своевременно принять меры к восстановлению гармонии, а также через глашатаев — все население, чтобы в стране не возникло паники.

И вот в старинной классической китайской книге «Шу-цзин» («Книга истории») рассказывается о том, что согласно древним летописям «В первый день последнего месяца осени Солнце и Луна неожиданно встретились в Тереме». Терем — это древнекитайское созвездие, включавшее в себя звезды β , δ , π и ρ *) теперешнего созвездия Скорпиона и некоторые слабые звезды созвездий Змееносца и Весов. Неожиданная же встреча Солнца с Луной означала солнечное затмение, непредсказанное астрономами. В той же книге сказано, что это солнечное затмение произошло в пятый год правления императора Чунг-канга, четвертого императора из династии Хсиа, столицей государства которого был город Нган-йи. Государственные же астрономы Хи и Хо (в другой транскрипции — Си и Хэ), как отмечено в книге, «попрали добродетель, бесчинно предались вину, забыли свои обязанности, нарушили годовой счет неба», не сумели предсказать этого затмения и не выполнили полагавшихся в подобных случаях действий. Среди сановников и населения от неожиданности поднялась паника, приведшая к беспорядкам, за что оба астронома, обвиненные в пьянстве и пренебрежении служебными обязанностями, были казнены.

*) См. греческий алфавит на стр. 201.

Уже значительно позже, какой-то анонимный автор даже сочинил такое четверостишие:

Здесь лежат тела и Хо, и Хи,
Чья судьба печальна и смешна:
Их повесили за то, что не смогли
Разглядеть затмения спяна.

Но, по-видимому, в этой печальной истории с двумя китайскими астрономами не совсем все верно. Что Хи и Хо были придворными астрономами при императоре Чунг-канге — это действительно так, но по другой версии древнекитайских летописей они были убиты за участие в гражданской войне, а пренебрежение обязанностями было лишь предлогом для казни. К тому же казнь в Древнем Китае совершалась не через повешение, а отсечением головы. И наконец, в той глубокой древности еще не знали истинной причины солнечных затмений, а поэтому упоминание о встрече Солнца с Луной явно принадлежит к гораздо более позднему периоду, что-нибудь не ранее VI в. до н. э., когда эта причина стала известной.

Но так это или иначе, но упомянутое солнечное затмение в Древнем Китае в царствование Чунг-канга действительно произошло и оно было почти полным. Это было первое солнечное затмение, упоминавшееся в древних китайских летописях. Но когда оно произошло по нашему календарю? На этот вопрос летописи, естественно, не дают ответа. Правда, историческими исследованиями удалось установить, что император Чунг-канг принял правление государством около 2160 г. до н. э., но большей точности добиться, казалось, было невозможно.

И все же эта задача была точно решена астрономией. В середине прошлого, XIX века, несколько астрономов выполнили колоссальный труд по вычислениям обстоятельств прошедших и будущих солнечных и лунных затмений. Эта работа была проведена не только в помощь историкам для установления дат исторических событий по упоминаемым в старинных летописях затмениям, но и для изучения движения Луны в далекую от нас древнюю эпоху. Проведя вычисления обстоятельств солнечных затмений для города Нган-йи, астроном Т. Опольцер установил, что

за весь 280-летний период времени с 2193 по 1914 г. до н. э. в этом городе было только одно солнечное затмение, во время которого Солнце находилось в созвездии Скорпиона: оно произошло 22 октября 2137 года до н. э., началось через 19 минут после восхода Солнца и в 7 час. утра достигло наибольшей фазы (было покрыто 85% солнечного диска), при которой уже заметно ослабление солнечного света и Солнце выглядит серпообразным. Вычисление обстоятельств этого затмения помогло установить, что император Чунг-канг вступил на престол в 2141 г. до н. э., и тем самым установить эру древнекитайского календаря того периода времени.

Древнекитайский философ Кун-фу-цзы (551—479 г. до н. э.), более известный под именем Конфуция, упоминает о полном солнечном затмении, происшедшем во второй год царствования императора Ю-Вана, годы правления которого указаны по сложному календарю той эпохи. Это — второе по счету солнечное затмение, упоминаемое в летописях. Вычисления показали, что оно произошло по нашему календарю 7 июня 780 г. до н. э. и тем самым выяснились годы правления Ю-Вана — с 781 по 771 г. до н. э.

Со временем, к началу VI в. до н. э., древние астрономы сумели установить причину солнечных затмений. Они обратили внимание на покрытия звезд Луной при ее движении по небу и на исчезновение Луны во время солнечных затмений, а отсюда пришли к выводу, что Луна встречается с Солнцем и заслоняет его. Вот почему не вызывает удивления упоминание в книге «Шу-цзин» о встрече Солнца с Луной в одном из созвездий неба.

Из истории известно, что в XII—VI вв. до н. э. в Малой Азии существовало государство Лидия, а в VII—VI вв. до н. э. на территории современного Ирана — государство Мидия. Выдающийся древнегреческий историк Геродот (около 484—425 г. до н. э.) в своей «Истории греко-персидских войн» пишет, что «Лидийцы и мидяне вели длительную войну с переменным успехом, но на шестой год войны, в самый разгар битвы, день внезапно обратился в ночь». Произошло полное солнечное затмение. Ужас охватил воинов, в страхе они побросали оружие и разбежались,

а их военачальники заключили перемирие. Кстати, наступление этого полного солнечного затмения предсказал философ той эпохи Фалес Милетский (около 624—547 г. до н. э.), который уже хорошо знал причины затмений и даже закономерность в их повторении. Астрономы XIX столетия вычислили дату этого затмения — оно произошло 28 мая 585 г. до н. э. Римский консул и писатель Марк Цицерон (106—43 г. до н. э.), описывая ту же битву между лидийцами и мидянами, сообщает о том, что это полное солнечное затмение произошло в четвертый год 48-й олимпиады, которые в Древней Греции проводились каждые четыре года. Отсюда легко было установить, что первые олимпийские игры были организованы в 776 г. до н. э., и, пользуясь этим, привести древнегреческую хронологию к системе современного календаря.

Геродот рассказывает о знаменитом Саламинском морском бое между греческим и персидским флотом, который произошёл в Сароническом заливе у южного побережья Греции. Бой этот знаменит тем, что персидский флот из 800 судов потерпел полное поражение от греческого флота, состоявшего из 350 кораблей. В этот день на южном побережье Греции произошло полное затмение Солнца и по нему была вычислена дата боя — 2 октября 480 г. до н. э.

При виде солнечных затмений ужас охватывал только несведущих и суеверных людей, которых в древние времена, естественно, было подавляющее большинство. Но знающие причину затмений не испытывали перед ними никакого страха и использовали свои знания в определенных целях. В начале Пелопонесской войны*) между древне-греческими городами-государствами Афинами и Спартой солнечное затмение чуть было не привело к срыву военно-морской экспедиции афинян, которой командовал Перикл (около 490—429 г. до н. э.) — выдающийся стратег афинского государства в период его расцвета. Перикл был учеником известного философа Анаксагора (около 500—428 г. до н. э.) и поэтому хорошо знал причину солнечных затмений. Когда афинский флот был готов к отплытию, началось затмение

*) Пелопонесс — полуостров на юге Греции.

Солнца. Наступившая темнота повергла моряков и солдат в ужас и была воспринята ими как дурное предзнаменование. Видя, что лоцман корабля пришел в сильное смятение и совершенно не в состоянии вести корабль, Перикл взял свой плащ, закрыл им лоцману глаза и спросил его, видит ли он в этом плаще что-либо ужасное или какое-то плохое предзнаменование. Получив от лоцмана отрицательный ответ, Перикл сказал ему: «Так в чем же тогда различие между этим плащом и тем телом, которое закрыло Солнце, разве только в том, что оно большего плаща!» Действия и слова Перикла успокоили не только лоцмана, но и солдат, наблюдавших эту сцену, после чего флот в правильном строю вышел из гавани. Согласно вычислениям это солнечное затмение не было полным (Солнце было закрыто Луной на 80%) и произошло в Греции 3 августа 431 г. до н. э., что помогло уточнить дату начала и продолжительность Пелопонесской войны (431—404 г. до н. э.).

Подобный случай произошел в 310 году до н. э. с Агафоклом, правителем Сиракуз (остров Сицилия) в 316—289 г. до н. э., который вел постоянные войны с городом-государством Карфагеном, расположенным на Средиземноморском побережье Африки, на берегу теперешнего Тунисского залива. Флот Агафокла, выйдя утром из Сиракуз в направлении на Карфаген, был к вечеру атакован внезапно появившейся флотилией карфагенян, и только наступившая темная безлунная ночь помогла Агафоклу вывести из окружения свои корабли и продолжить путь к Карфагену. Утром следующего дня внезапно наступило полное солнечное затмение, вызвавшее панику среди войска, так как солдаты были убеждены, что боги этим явлением предвещают им несчастье. Тогда Агафокл, сделав вид будто бы он тоже верит в предзнаменование свыше, объявил своим воинам: «Если бы затмение случилось раньше нашего отъезда из Сиракуз, то оно могло бы предвещать то тяжелое положение, в котором мы вчера оказались, окруженные неприятелем. Но затмение произошло после этого, а так как оно всегда предвещает перемену событий, то наши дела теперь поправятся и мы нанесем большой урон карфагенянам, которым до сих пор просто везло». Слова

военачальника ободрили воинов, тем более, что затмение вскоре окончилось, и флот Агафокла беспрепятственно достиг Карфагена. В древней истории это солнечное затмение часто называется затмением Агафокла.

Можно привести много примеров, когда вычисление обстоятельств и дат солнечных затмений позволило установить или уточнить не только даты исторических событий, но и системы древних летосчислений. Почему главным образом солнечные, а не лунные затмения могут служить этой цели, будет видно из дальнейшего, а пока отметим, что вычисление обстоятельств полного солнечного затмения 20 марта 71 г. нашей эры помогло разобраться в запутанном римском счете времени и установить по нашему летосчислению дату введения в Древнем Риме юлианского календаря (1 января 45 г. до н. э.), а по ней установить и эру от «основания Рима» — 21 апреля 753 г. до н. э. Так астрономия помогает истории разобраться в хронологии древних народов и государств.

Лунных затмений (рис. 2), особенно полных, боялись не менее, чем солнечных, потому что Луна не только покрывалась непонятной тенью, но часто при этом становилась красной, будто обливалась кровью. Суеверные люди видели в этом явлении нападение чудовищ или злых духов на Луну, тоже считавшуюся у язычников божеством, ее ранение или даже убийство, а уже во времена господства христианской религии усиленно распространялись слухи о том, что это бог напоминает грешникам о первом злодеянии Каина, старшего сына первых людей Адама и Евы, убившего своего брата Авеля.

Первое полное лунное затмение зарегистрировано тоже в древнекитайских летописях и упоминается в книге Чоу-шу (книга Династии Чоу) под 35 годом правления Вен-Ванга. Вычислено, что оно произошло 29 января 1136 г. до н. э., и тем самым установлена эра Вен-Ванга, соответствующая 1171 г. до н. э. Последующие три зарегистрированных полных лунных затмения упомянуты в знаменитом труде «Альмагесте» выдающегося древнегреческого астронома Клавдия Птолемея (ок. 87—165), по древневавилонским летописям. Первое из них произошло в 27 году

эры Набонассара или 19 марта 721 г. до н. э., а два последующих — 8 марта и 1 сентября 720 г. до н. э. Мы, конечно, не будем перечислять всех лунных затмений, отмеченных в различных летописях и трудах, но о некоторых из них все же вкратце расскажем.

Древнегреческий историк Плутарх (ок. 46—126) в книге «Жизнь Никия» упоминает о полном лунном

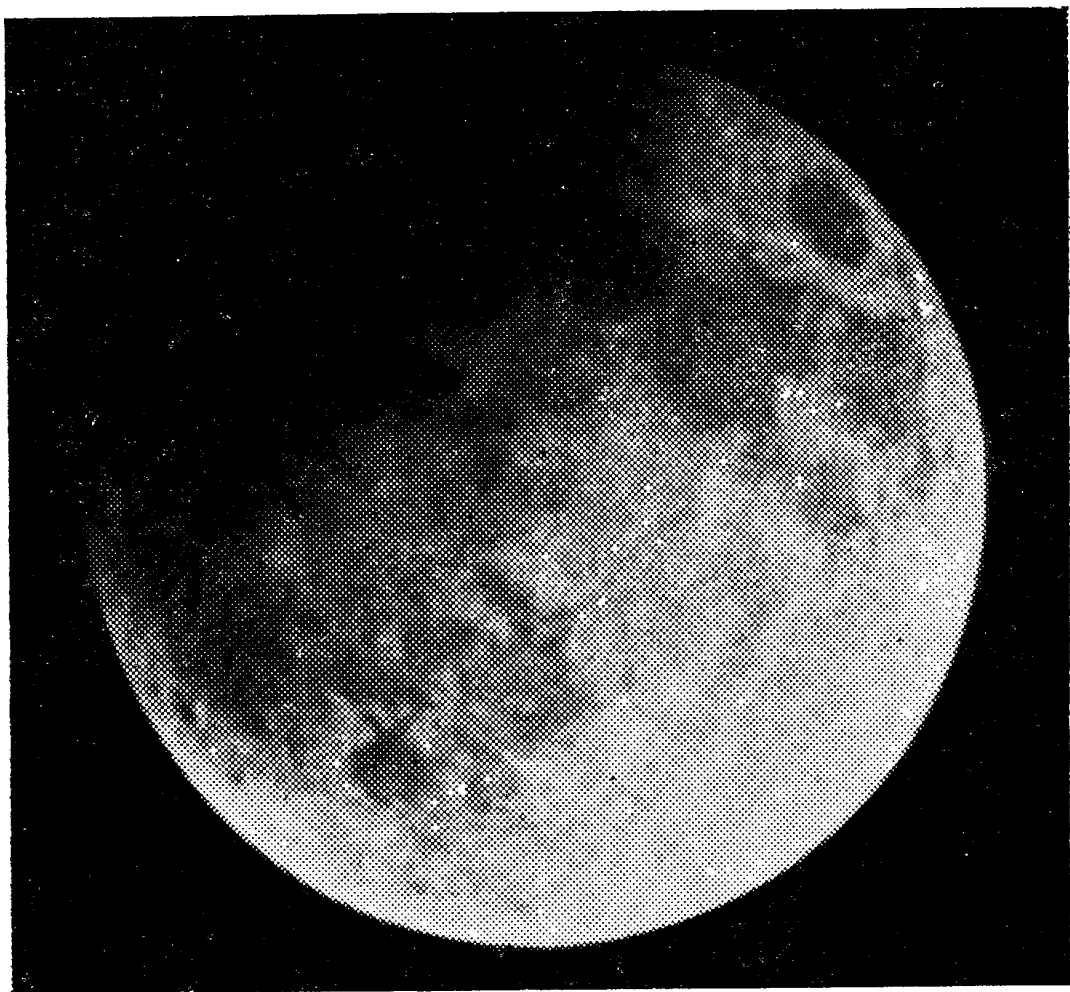


Рис. 2. Частное лунное затмение.

затмении, происшедшем в 4 году 91-й олимпиады, или 27 августа 413 г. до н. э., которого испугался военачальник афинской армии Никий, что привело к гибели афинян. Армия находилась в Сицилии и после боев с сиракузской армией была настолько ослаблена, что Никий принял решение об оставлении острова под покровом ночи. Плутарх пишет: «Все было подготовлено для погрузки на корабли. Но ночью произошло затмение Луны, вид которого испугал Никия и его окружение, в армии поднялась паника. Они глядели на затмение как на странное и сверхъестественное явление, объявляющее о великом бедствии». Бедствие действительно произошло,

но причиной его явилось не затмение, а сиракузская армия.

В истории известна крупная победа армии Александра Македонского (356—323 г. до н. э.) над войсками Дария III, персидского царя с 336 по 330 г. до н. э. Плутарх в «Жизни Александра» пишет: «До начала праздников в Афинах произошло затмение Луны. 11 дней спустя после затмения две армии сблизились друг с другом. Ночью Дарий при свете факелов делал смотр войскам и в их лагере было очень шумно. Военачальники Александра советовали ему предпринять ночную атаку, но он решил дать ночью отдых бойцам и произнес свой знаменитый ответ: „Я не краду победы!“». По исследованиям, упомянутое полное лунное затмение произошло 20 сентября 331 г. до н. э., и следовательно, Александр одержал победу над Дарием 1 октября 331 г. до н. э.

Причины лунных затмений, видимо, стали ясны в VI в. до н. э., после того как древнегреческие философы убедились в шарообразности Земли. В IV веке до н. э. величайший физик древности Аристотель (384—322 г. до н. э.) доказывал шарообразность Земли именно по виду ее тени на Луне во время лунных затмений. Поэтому у культурных людей лунные затмения уже не вызывали страха, но среди темного народа этот страх был очень велик.

Древнеримский историк Корнелий Тацит (ок. 55—120) сообщает о лунном затмении 27 сентября 14 г. до н. э., которое римские солдаты приняли за гнев Луны на них, и желая возвратить ей прежнюю красоту и блеск, подняли неимоверный грохот, используя для этого трубы, барабаны и медные тарелки.

Полное лунное затмение 1 марта 1504 г. оказало Христофору Колумбу (1451—1506) неоценимую услугу. Его очередная экспедиция на острове Ямайке оказалась в тяжелом положении, продукты питания и питьевая вода были на исходе и людям грозила голодная смерть. Попытки Колумба получить пищу у местных индейцев окончились безрезультатно. Но Колумб знал, что 1 марта 1504 г. должно произойти полное лунное затмение, и под вечер он предупредил вождей живших на острове племен, что он похитит у них Луну, если ему откажут в снабжении экспеди-

ции продуктами и водой. Сначала вожди отнеслись к словам Колумба с недоверием, но как только началось затмение, индейцев охватил неописуемый ужас. Продукты и вода были немедленно доставлены, а вожди на коленях умоляли Колумба вернуть им Луну. Колумб, естественно, не мог «отказать» в этой просьбе, и вскоре, по окончании затмения, Луна, к восторгу индейцев, снова засияла на небе.

На Руси тоже были распространены суеверия, возникшие еще в те далекие времена, когда языческие славянские племена поклонялись явлениям природы. Как и у других народов, у древних славян было множество богов: Даждь-бог или Ярило — бог Солнца, Стри-бог — бог ветра, Перун — бог грозы, Велес-бог — покровитель скота и другие, а кроме них, еще менее значительные боги, обитавшие в своих земных владениях. По народным повериям, в лесах жили их хозяева, лешие, — покровители охоты, и чтобы она была удачной, охотники, входя в лес, клали на пень краюху хлеба, предназначенную лешему; в водоемах обитали водяные и русалки, а в домах поселялись домовые — покровители семей. С распространением на Руси христианства (с 988 г. н. э.) главные языческие боги были вытеснены, и хотя русский народ никогда не отличался большой религиозностью, а больше был склонен к обрядам, тем не менее суеверия среди него, из-за незнания явлений природы и религиозных предрассудков, получили широкое распространение, а некоторые из них, правда, в очень редких случаях, бытуют, к сожалению, и поныне.

Вполне понятно, что и на Руси солнечные и лунные затмения вызывали безотчетный страх и суеверные толкования, о чем свидетельствуют русские летописи — рукописные книги с хроникальной записью различных событий. Так, в Новгородской летописи, охватывающей события XI—XVI веков н. э., под 1124 годом (по нашему летосчислению) записано: «Месяца августа в 11 день, перед вечерней, почя убывати солнца и погипе все. О, велик страх и тьма бысть!» Летописец описывает полное солнечное затмение и отмечает, что сначала Солнце начало уменьшаться, а потом полностью исчезло. В той же летописи о кольцеобразном солнечном затмении 6 марта

1207 г. (по нашему стилю) записано: «Тое же зимы бысть знаменье на небеси в солнци, месяца февраля в 28 день... мнози бо вернии человеци зряще моляхуся богу, дабы бог обратил знаменье то на добро». Или, на современном языке: «В ту зиму, 28 февраля месяца было с Солнцем на небе знамение... многих верующих людей видели молящимися богу, чтобы бог обратил это знамение к добру». Расхождение в датах 6 марта и 28 февраля не должно вызывать недоумений, так как в летописи дата приведена по принятому тогда юлианскому календарю (старому стилю).

В знаменитой Ипатьевской летописи, содержащей записи с IX до XIV в. н. э. и названной так потому, что она была обнаружена в Ипатьевском монастыре под Костромой, имеется запись о полном солнечном затмении 1187 г.: «Того же лета бысть знамение месяца сентября 15 день: тьма бысть по всей земле, якоже дивитися всим человеком, солнце бо погибе, а небо погоре облаки огнезарными. Таковая бо знамения не на добро бывають: в той бо день того месяца взят бысть Ерусалим безбожными сарацины» *). В переводе на современный русский язык эта запись гласит: «В тот же год, 15 сентября, было явление: на удивление всем людям тьма распространилась по всей земле, Солнце исчезло, а небо загорелось огненными облаками. Такие явления не к добру бывають: в тот самый день того месяца Иерусалим был взят безбожными сарацинами». Астрономия внесла существенные уточнения в эту запись летописца, который либо описывал это явление по памяти, значительное время спустя после него, либо пользовался несколько иным календарем, потому что в действительности это затмение произошло 4 сентября 1187 г. Кстати, и в упоминании о взятии Иерусалима имеется ошибка: город был завоеван египетским султаном Салах-ад-дином (1138—1193) 2 октября 1187 г.

Астрономия помогла установить и день начала неудачного похода новгород-северского князя Игоря Святославича (1151—1202 г.) на половцев, похода,

*) Сарацинами в те времена называли арабов и вообще мусульман.

описанного в «Слове о полку Игореве»: в этот день 17 мая 1185 г. произошло полное солнечное затмение, вызвавшее смятение в княжеской дружине. Кто знает, может быть суеверный страх, внушенный затмением в самом начале похода, все время преследовал воинов и снизил их боеспособность в битве при Каяле.

Таким образом, изучение древних солнечных затмений помогает науке уточнить многие даты исторических событий и даже внести коррективы в их последовательность. Но почему же при таких исследованиях отдается предпочтение полным или почти полным солнечным затмениям, а не лунным? Все дело в том, что каждое полное солнечное затмение происходит в узкой и притом определенной полосе земной поверхности, а от года к году положение этой полосы значительно меняется, да и Солнце в разные месяцы года бывает в различных созвездиях. Поэтому, по местности, в которой происходит полное (или почти полное) солнечное затмение, можно вычислениями установить его точную дату. Лунные же затмения видны со всего ночного полушария Земли, и следовательно, даже за сравнительно небольшой промежуток времени в каждой местности может произойти несколько таких затмений, даты которых вычисляются тоже с большой точностью. Но установить соответствие одной из вычисленных дат определенному историческому событию бывает затруднительно, хотя и возможно.

Однако изучение древних солнечных затмений имеет не только исторический, но и астрономический интерес, так как путем сравнения перемещений лунной тени по земной поверхности можно установить естественную эволюцию движения Луны, и именно такое сравнение впервые навело на мысль о непрерывном (вековом) незначительном замедлении вращения Земли. Это замедление ныне окончательно обнаружено, хотя и составляет всего лишь 0,0014 сек за столетие.

Но не только в древние и средние века, но даже и в более позднее время страх перед затмениями охватывал суеверных людей, особенно тех, кто находился под гнетом религии и эксплуатации. Известный

французский астроном Пьер Жансен (1824—1907)^{*)} наблюдал полное солнечное затмение 18 августа 1868 г. в Индии и из местных жителей выбрал себе несколько помощников, подробно объяснив им причину затмения. Помощники восприняли его объяснения и согласились участвовать в наблюдениях, но как только перед самым началом полного затмения стало темнеть, они в страхе разбежались. Аналогичное воздействие солнечные затмения оказывали на простой народ дореволюционной России, где, как известно, подавляющее большинство населения было неграмотным и угнетенным. Известный русский писатель В. Г. Короленко (1853—1921) в своем правдивом рассказе «На затмении» описывает поведение местных жителей небольшого приволжского городка Юрьевца, где 19 августа 1887 г. происходило полное солнечное затмение, для наблюдений которого из Москвы приехали астрономы А. А. Белопольский (1854—1934) и П. К. Штернберг (1865—1920). В. Г. Короленко успокаивал местных жителей и опровергал распространявшиеся среди них слухи о том, что «Земли будет трясение, люди не станут узнавать друг дружку... А там и миру скончание». В этом рассказе Короленко показывает и другое затмение — затмение народного сознания под гнетом религии и царизма, и предвещает наступление утра, освобождение народа.

Такое же затмение в сознании простых и неграмотных крестьян царской России описывается в заметке газеты «Русские ведомости» от 9 августа 1887 г. *), где сообщается о том, что астрономов, приехавших наблюдать полное солнечное затмение 19 августа 1887 г. «...весьма неласково приняли крестьяне, особенно в селе Савкино. Здесь крестьяне едва не произвели насилия над ними, крича, что они заучились, хотят быть хитрее бога и этим навлекают только на них болезни, неурожай и прочие беды».

Но не только в деревнях, даже в самой Москве и вблизи нее распространялись панические слухи и ужас охватывал людей при виде солнечного затмения. Вот что было напечатано в «Петербургской газете» два дня спустя после полного солнечного затме-

*) 21 августа по нашему календарю.

ния 19 августа 1887 г., видимого в окрестностях подмосковного города Клин: «Мрак густел все больше и больше. Еще секунда, и толпа бросилась бежать порознь и кучами... Движение это было, должно быть, чисто безотчетное, потому что вся масса бежала не назад, на станцию или в город, домой (как следовало бы ожидать), а напротив, прямо в поле, карабкаясь на бугорки и перепрыгивая через канавки. Тяжелое удручающее впечатление производило на постороннего зрителя это молчаливое беспомощное бегство... Трудно сказать, до чего дошла бы всеобщая паника, если б в эту минуту не раздалось восклицание: «Кончается!». В ответ раздался смешанный гул голосов толпы. Действительно, начало светать. Радость, столь же безотчетная, как и минувший страх, овладела всеми».

Если бы полные солнечные затмения были видимы в каждой местности часто, то к ним, может быть, просто бы привыкли, как, скажем, привыкли к изменению вида Луны. Но такие затмения наступают в определенной местности столь редко, что далеко не каждому поколению местных жителей удастся их видеть, а поэтому внезапность явления отрицательно воздействует на суеверных и несведущих людей, не знающих его причин, особенно если в их стране процветает невежество. Суеверные да еще к тому же верующие люди принимают затмение за чудо. Но еще Петр Первый (1672—1725) прекрасно понимал необходимость разъяснения причин затмений населению, чтобы парализовать возможность паники среди него. Незадолго до полного солнечного затмения 12 мая 1706 г. *) Петр Первый писал своему ближайшему помощнику генерал-адмиралу Ф. А. Головину (1650—1706): «Господин адмирал. Будущаго месяца в первый день будет великое солнечное затмение. Того ради изволь сие поразгласить в наших людях, что когда оное будет, дабы за чудо не поставили. Понеже, когда люди про то ведают прежде, то не есть уже чудо».

*) По принятому тогда в России календарю эта дата соответствовала 1 мая 1706 г.

В нашей стране, полностью освободившейся от политического, экономического и религиозного гнета, совершенно исчез страх перед солнечными и лунными затмениями. Наоборот, в связи с резко возросшей культурой всех слоев населения проявляется колоссальная любознательность и интерес к таким явлениям. Едва только астрономы приезжают в местность, где должно произойти солнечное затмение, и начинают устанавливать научные инструменты, как сразу же их окружают вниманием, предложением помощи и, конечно, обращаются с просьбой о прочтении лекций и о разрешении присутствовать во время затмения рядом с наблюдательной площадкой. Последний раз автор этих строк встретился с проявлением, правда, очень робкого страха и сомнения перед полным солнечным затмением 30 июня 1954 г. Наша экспедиция расположилась на окраине небольшого города Чернобыля, Киевской области. И вот, дня за три до полного затмения к экспедиции подошел седой старик, лет 70—75, и неуверенным голосом спросил, правда ли будет затмение Солнца, не погибнет ли от этого Земля и откуда мы знаем, что затмение произойдет? Когда автор этих строк рассказал о причине солнечного затмения и показал ему это явление на простейшем опыте, старик долго благодарил, а 30 июня сидел около нашего лагеря и сквозь темное стекло с удовольствием следил за ходом затмения. В более поздний период перед и во время полных солнечных затмений 15 февраля 1961 г., 22 сентября 1968 г. и 10 июля 1972 г. на какие-либо опасения или сомнения даже намека не было, хотя эти затмения проходили в местностях нашей страны, весьма отдаленных от ее центральных районов. В странах же, находящихся под гнетом империализма, страх перед затмениями распространен до сего времени.

Солнечные и лунные затмения принадлежат к таким же естественным явлениям, как и все остальное в природе, и, изучив закономерности этих явлений, современная астрономия имеет возможность за много лет вперед вычислять их наступление, причем вычислять с очень высокой точностью до 1 сек времени, а часто бывает и выше. Однако еще в глубокой древности астрономы-астрологи обязаны были предска-зы-

вать затмения и они, как правило, умели это делать, хотя и не знали истинных причин этих явлений. Просто из многовековых наблюдений затмений была обнаружена закономерность в их повторении, используя которую астрологи предсказывали наступление предстоящих затмений. Эта закономерность станет понятной после того, как мы познакомимся с движениями Земли и Луны, а также с условиями, при которых происходят затмения.

О современных задачах наблюдений солнечных и лунных затмений рассказано на стр. 85 и 94.

2. ВИДИМОЕ ГОДОВОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА И ОРБИТА ЗЕМЛИ

Темная, безлунная и безоблачная ночь. Весь небосвод усыпан звездами. Четко выделяются фигуры созвездий с яркими звездами. Стоит внимательно присмотреться к звездному небу, как легко заметить его медленное вращение с востока к западу. Величественно движутся друг за другом созвездия Большой Медведицы, Волопаса, Геркулеса, Лиры и Лебедя, также, как и остальные, не нарушая порядка движения и своих характерных фигур. Из-за восточной стороны горизонта постепенно появляются и поднимаются над ней иные созвездия, а расположенные в западной половине небосвода медленно опускаются к горизонту и исчезают за ним. Получается полное впечатление, будто небо со всеми его светилами вращается вокруг Земли.

Теперь хорошо известно, что небо — явление чисто кажущееся и в действительности никакого небосвода в природе не существует, а небесные светила разбросаны в бесконечном пространстве на самых разнообразных расстояниях от Земли, но эти расстояния настолько невообразимо велики, что наши глаза не в состоянии их различить, и поэтому все небесные светила представляются нам одинаково удаленными и как будто расположенными на сферической поверхности, на воображаемом небе. Эта кажущаяся сферическая поверхность в астрономии называется небесной сферой, и в центре ее находится наблюдатель.

Для изучения как видимых, так и реальных движений небесных светил приходится определять их взаимные расстояния на небе, что возможно осуществить лишь измерением углов между направлениями на светила. Поэтому все измерения на небесной сфере, будь то расстояния между ее точками (светилами) или видимые размеры небесных тел, проводятся только в угловых единицах—градусах ($^{\circ}$), минутах ($'$) и

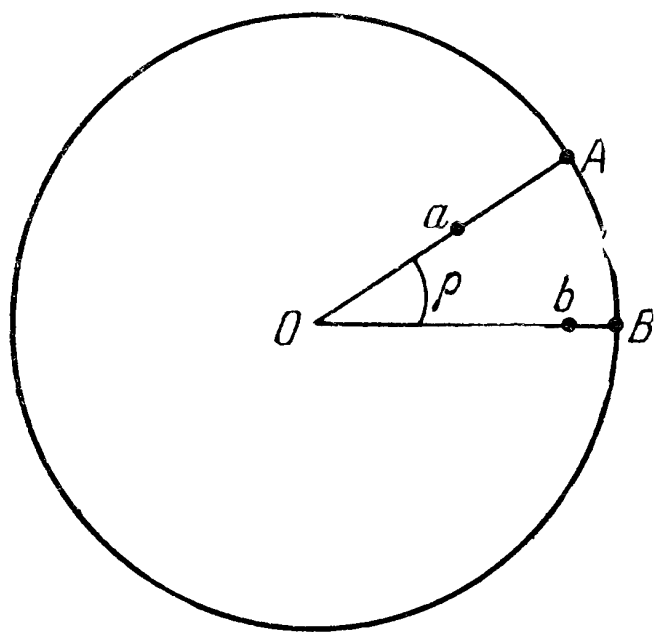


Рис. 3. Расположение светил a и b в пространстве и их видимое положение A и B на небе O — наблюдатель.

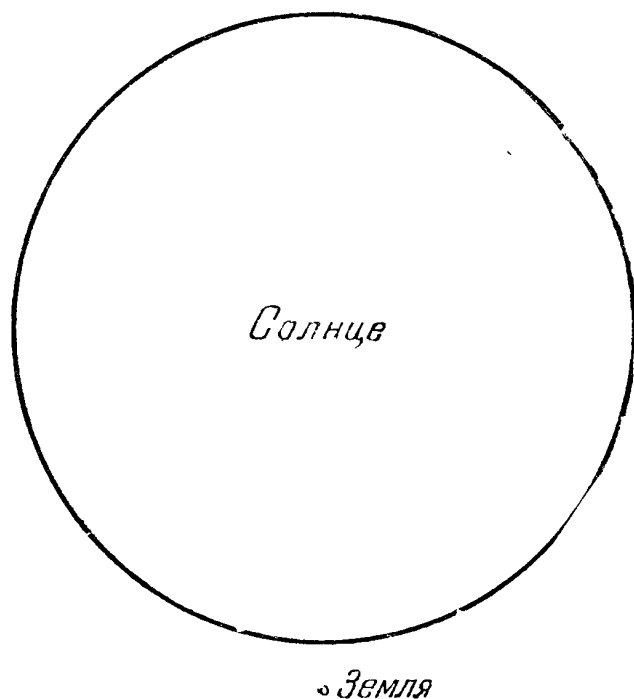


Рис. 4. Сравнительные размеры Солнца и Земли.

секундах ($''$) дуги. По существу, наблюдатель измеряет угломерным инструментом центральный угол (ρ) между направлениями на разные точки (A и B) небесной сферы (рис. 3), но на самой сфере видимое расстояние между точками изображается дугой (AB), стягивающей этот угол. В виде примера отметим, что угловые (или видимые) диаметры Солнца и Луны близки к $0^{\circ},5$.

Современная наука о небесных телах, астрономия, располагает могущественными средствами измерения расстояний до небесных светил, изучения их движения и физической природы. Выяснилось, что Солнце удалено от Земли на расстояние в 149,6 млн. км и именно поэтому видно нам небольшим диском с диаметром в $0^{\circ},5$, а в действительности представляет собою огромный шар, истинный (линейный) диа-

метр которого превышает средний диаметр Земли (12 740 км) в 109 раз и близок к 1400 тыс. км (точнее, 1392 тыс. км) (рис. 4). Масса Солнца превосходит массу Земли в 333 000 раз, а средняя плотность солнечного вещества, полученная делением массы Солнца на его объем, наоборот, меньше средней плотности Земли ($5,52 \text{ г/см}^3$) и составляет $1,4 \text{ г/см}^3$. В отличие от твердой Земли, Солнце газообразно, причем основная масса солнечного газа представляет собой плазму, т. е. смесь электрически заряженных частиц — ионов и электронов. Газовый шар не может иметь резких и правильных границ, поскольку плотность его вещества, даже очень высокая в глубине, постепенно уменьшается к периферии и во внешних областях настолько мала, что газовые частицы, обладающие большими и крайне различными скоростями, уходят от основной массы шара на различные расстояния. Солнце представляется нам правильным диском с резко очерченными краями потому, что его внешняя, крайне разреженная и слабо светящаяся оболочка просто не видна на фоне яркого дневного неба, и мы видим уже более глубокий плотный слой, имеющий шарообразную форму. Некоторую, может быть несколько и примитивную, аналогию этому представляет легкий туман, состоящий из мельчайших, не видимых в отдельности капелек влаги. Вблизи такой разреженный туман совсем не заметен и несколько не ослабляет видимости близких предметов, но далекие предметы скрыты туманной пеленой, хорошо воспринимаемой зрением. Подобным же образом наш взгляд не может проникнуть сквозь уплотненный слой газообразного солнечного вещества, и мы видим яркую поверхность Солнца, которую называем фотосферой, т. е. светящейся сферой (от греческого «фотос» — свет). Именно этой видимой поверхностью Солнца определяются его угловые и истинные размеры.

Солнечная фотосфера состоит в основном из водорода, ее температура близка к 6000° , а давление в ней — около $0,1 \text{ атм}$, но с глубиной оба эти параметра быстро возрастают и в недрах Солнца температура достигает 15 млн. градусов, давление — 200 миллиардов атмосфер, а плотность вещества увеличивается

до 150 г/см^3 . При такой колоссальной температуре в недрах Солнца протекают ядерные процессы, вырабатывающие потрясающую по величине энергию, которая излучается в мировое пространство, и лишь одна двухмиллиардная доля этой энергии попадает на Землю, поддерживая на ней пышную жизнь. Достаточно отметить, что каждый квадратный метр земной поверхности каждую секунду получает от Солнца около 1,4 килоджоуля энергии (мощность 1,4 кВт), а это означает, что мощность солнечного излучения составляет $4 \cdot 10^{23} \text{ кВт}$.

Внешние слои Солнца бывают видны лишь во время полных солнечных затмений на фоне потемневшего неба. Тонкий, прилегающий к фотосфере слой высотой около 12—15 тыс. км и состоящий в основном из водорода и гелия, имеет красновато-розовую окраску, за что и получил название хромосферы, т.е. окрашенной сферы (от греческого «хрома» — цвет). В хромосфере часто наблюдаются протуберанцы (от латинского *protuberare* — вырастать) — красноватые выступы, представляющие собой гигантские фонтаны раскаленных газов, поднимающиеся над фотосферой до высоты в 500 тыс. км, а иногда и более, или почти на величину солнечного радиуса (рис. 5). Но наиболее эффектной выглядит солнечная корона — самая внешняя необычайно разреженная оболочка Солнца, имеющая лучистое строение и приятный жемчужный цвет, иногда со слегка зеленоватым отливом. Состоящая из ионов и электронов, корона обильно излучает радиоволны, а самые далекие ее зоны вообще не видны и обнаруживаются только по их радиоизлучению. Современная астрономическая аппаратура позволяет видеть хромосферу и внутреннюю область короны повседневно, а не только во время полных солнечных затмений.

Природа звезд идентична природе Солнца. Звезды также являются раскаленными газовыми шарами, размеры которых весьма разнообразны — от размеров Земли и даже менее, до тысячи солнечных диаметров. Температура разных звезд тоже различна, но в большинстве своем заключена в пределах от 3000° до $30\,000^\circ$, а излучаемая ими энергия не только сравнима с солнечной, но часто превышает ее в тысячи и де-

сятки тысяч раз. Но с Земли звезды выглядят светящимися точками из-за их колоссального удаления. Достаточно отметить, что даже самая близкая к нам яркая звезда Толиман (звезда α в созвездии Центавра) удалена от Земли в 275 000 раз дальше Солнца. Свет, распространяющийся с наибольшей в природе скоростью, равной 300 000 км/сек, доходит от Солнца

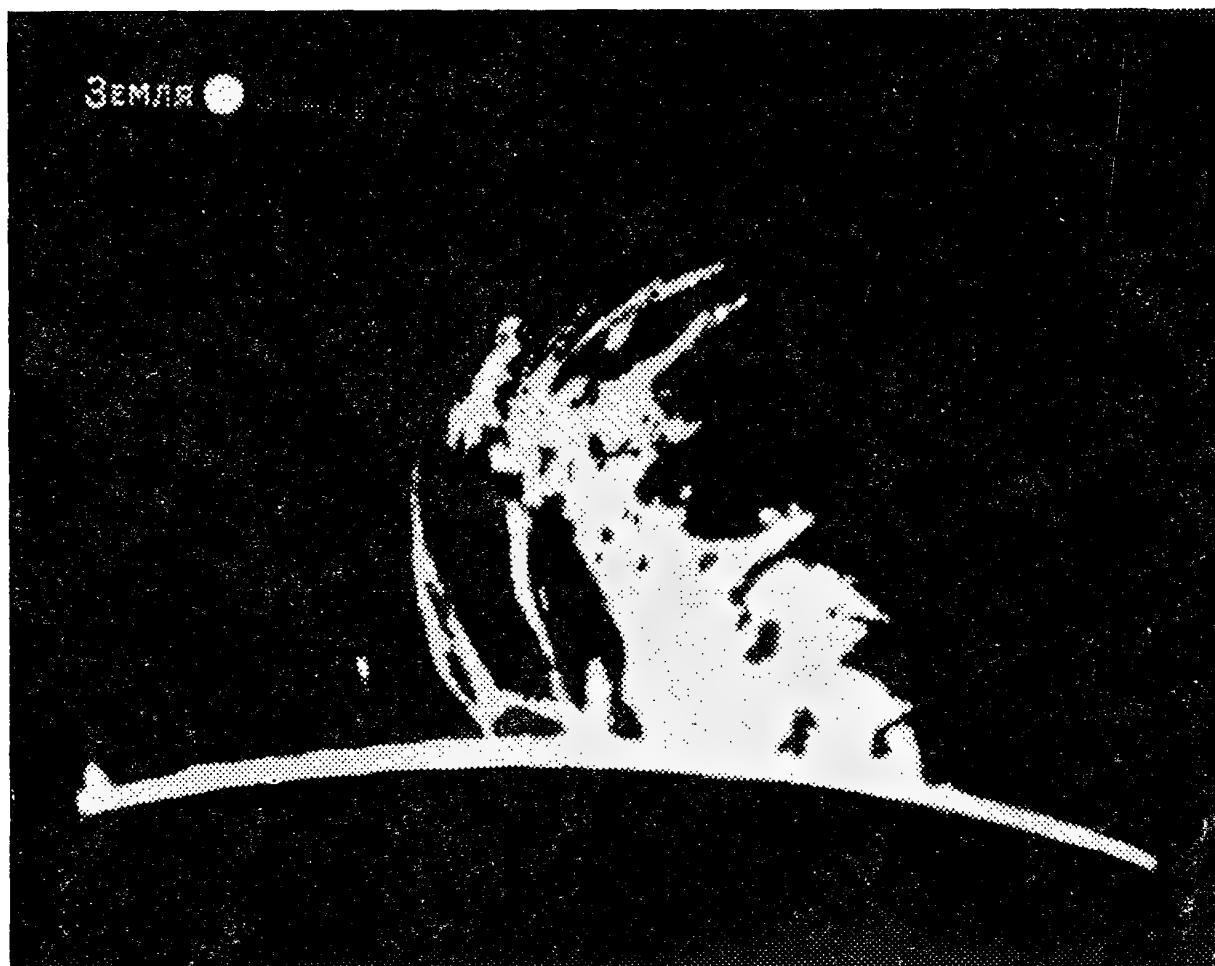


Рис 5 Солнечный протуберанец в сравнении с Землей.

до Земли за 8 мин 19 сек, а от Толимана — за 4,33 года. От других, сравнительно близких и потому ярких звезд он идет к Земле годами и десятилетиями, а от подавляющего большинства слабых звезд достигает Земли через сотни, тысячи и десятки тысяч лет после того как был излучен ими. И хотя все звезды движутся в пространстве, их видимые смещения на небе, из-за огромных расстояний до них, просто ничтожны и обнаруживаются только у относительно близких звезд при сравнении фотографий звездного неба, полученных через промежутки времени в 30—40, а часто и более лет. Поэтому взаимное расположение звезд на небе представляется нам неизменным, и

фигуры созвездий сохраняют свой вид на протяжении тысячелетий. Видимое же суточное вращение неба вокруг Земли с востока к западу, восход и заход небесных светил, в том числе Солнца и Луны, явления кажущиеся и объясняются вращением Земли вокруг своей оси в противоположном направлении, т. е. с запада к востоку. Тем не менее, ради краткости, принято говорить о видимых явлениях, т. е. о суточном вращении неба, восходе и заходе небесных светил.

Когда светила поднимаются над горизонтом, их угловое расстояние от него, называемое высотой, увеличивается, а при приближении к горизонту — уменьшается. Наибольшая возможная высота светила, равная 90° , может быть только в том случае, если светило проходит в зените, т. е. в точке неба, расположенной точно над головой наблюдателя. Видимое суточное вращение неба происходит вокруг земной оси и поэтому две диаметрально противоположные его точки*), в которые эта ось направлена, неподвижны: они называются полюсами мира. Из-за малых размеров Земли в сравнении с расстояниями до звезд одна и та же точка неба (например, полюс мира или какая-либо звезда) видна из разных мест земной поверхности по параллельным направлениям, и вследствие этого наблюдателю кажется, что небо вращается вокруг прямой линии, проходящей через его глаз. Эта прямая линия параллельна оси вращения Земли, проходит через оба полюса мира и называется осью мира. В небе северного полушария Земли над горизонтом находится северный полюс мира, высота (h_p) которого всегда равна географической широте (φ) местности ($h_p = \varphi$). На горизонте, под северным полюсом мира, лежит точка севера, а диаметрально противоположно ей — точка юга. Через обе эти точки, полюс мира и зенит, проходит большой круг небесной сферы, называемый небесным меридианом. Выше всего над горизонтом светила поднимаются при пересечении ими небесного меридиана либо над точкой юга, либо между полюсом мира и зенитом — все зависит от расположения светил на небе и от географиче-

*) В северном полушарии Земли видна лишь одна из этих точек.

ческой широты места наблюдения. Нанвысшее положение светила над горизонтом называется верхней кульминацией (от латинского *culmen* — вершина).

Рядом с северным полюсом мира, на расстоянии около 1° от него, расположена главная звезда α созвездия Малой Медведицы, именно поэтому именуемая Полярной звездой. Из-за своей близости к северному полюсу мира она кажется неподвижной, но точные измерения, особенно на фотографиях звездного



Рис. 6. Фотография участка звездного неба вокруг Полярной звезды.

неба, выявляют ее суточное движение, присущее всем звездам из-за вращения Земли: все они движутся по кругам разных угловых размеров — небесным параллелям. Эти небесные параллели наглядно выявляются в виде концентрических дуг на фотографиях участка звездного неба вокруг Полярной звезды, полученных неподвижной фотокамерой (рис. 6). Общий центр кривизны концентрических дуг представляет собой северный полюс мира.

Наибольшая из небесных параллелей, все точки которой удалены от полюсов мира ровно на 90° , называется небесным экватором, который пересекается с горизонтом в точках востока и запада, а над точкой юга поднимается на высоту $h_e = 90^\circ - \varphi$, постоянную в каждой местности.

Вполне очевидно, что небесный экватор представляет собой большой круг, образованный на небе плоскостью земного экватора, и поэтому он делит небо на северное и южное полушария, подобно тому как земной экватор разделяет земную поверхность. В местностях северного полушария Земли видно все северное небесное полушарие и только часть южного, расположенную между небесным экватором и горизонтом.

Каждая звезда находится на своей небесной параллели, отстоящей от небесного экватора на строго определенном угловом расстоянии, называемом склонением (δ). Светила северного небесного полушария имеют положительное склонение, а светила южного — отрицательное склонение. Склонение всех точек небесного экватора равно нулю ($\delta = 0^\circ 0'$). Упомянутые точки и круги небесной сферы показаны на рис. 7.

Теперь присмотримся к Солнцу. Летом Солнце восходит на северо-востоке, вблизи полдня высоко поднимается над точкой юга и вечером заходит на северо-западе. Зимой же оно восходит на юго-востоке, его суточный путь над горизонтом низок, и заходит оно на юго-западе. Следовательно, в отличие от звезд, Солнце не занимает определенного положения на небе, а участвуя в его суточном вращении (из-за вращения Земли), еще само медленно по нему перемещается. Действительно, достаточно пронаблюдать в разные месяцы года вид звездного неба вскоре после окончания сумерек, как сразу можно убедиться в перемещении Солнца на фоне звезд. В начале весны, вечером, около 21 часа, в западной области неба вблизи горизонта видно созвездие Овна, в юго-западном секторе — созвездия Тельца и Ориона, в южной стороне неба созвездие Близнецов, а восточнее него — созвездие Льва. Через месяц, в апреле, в те же часы созвездия Овна уже не видно — оно зашло за горизонт вместе с Солнцем; значит, за прошедший месяц

Солнце сместилось по небу к востоку и пришло в созвездие Овна. Из-за этого и все созвездия сдвинулись к западу: Телец и Орион находятся вблизи западного горизонта, созвездие Близнецов — на юго-западе, Лев — в южной области неба, а на юго-востоке поднялось созвездие Девы.

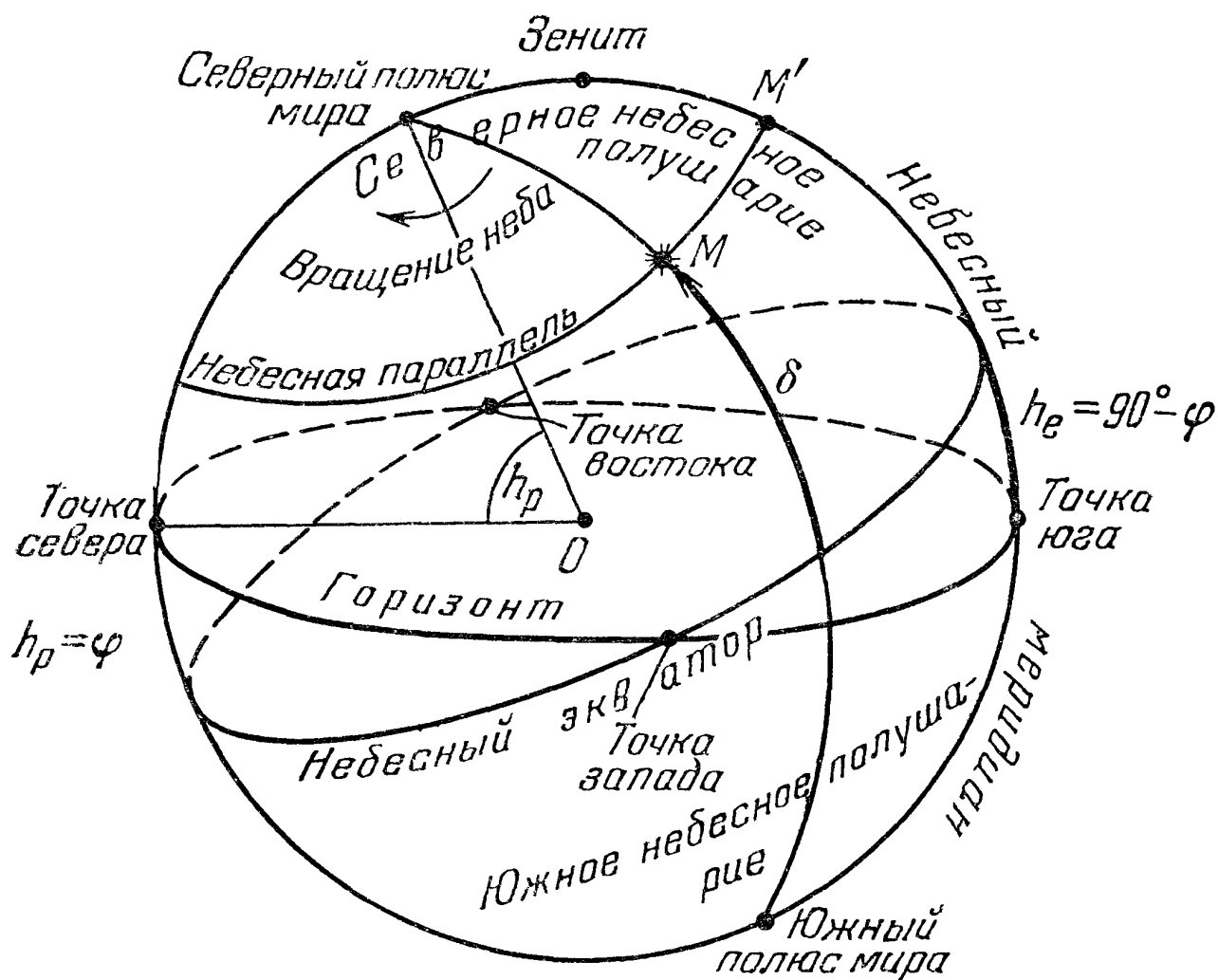


Рис 7 Небесная сфера: δ — склонение светила M ; M' — положение того же светила M в верхней кульминации.

Еще через месяц в те же часы уже не видно созвездия Тельца, так как теперь оно зашло вместе с Солнцем, которое за истекший месяц опять заметно сместилось к востоку и перешло из созвездия Овна в созвездие Тельца. Так постепенно меняется вид звездного неба, регулярно повторяющийся по сезонам года. Следовательно, на протяжении года Солнце медленно перемещается на фоне звезд с запада к востоку (навстречу суточному вращению неба) по определенным созвездиям и за год (365 суток) совершает по небу один оборот (360°), смещаясь за сутки примерно на 1° или на два своих видимых диаметра. Это смещение сводится к отставанию Солнца от звезд в суточном вращении неба: если Солнце взошло одновременно с

какими-то звездами, то к вечеру оно отстает от них к востоку на $0^{\circ},5$ и заходит позже них примерно на 2 минуты. Из-за этого моменты восхода и захода звезд ежедневно наступают на 4 мин. (точнее, на 3^m56^s) раньше, чем накануне, а за месяц сдвигаются вперед на 2 часа.

Но видимое годовое движение Солнца происходит не по небесному экватору. Измерения положения Солнца на небе показали, что ежегодно, примерно 20 или 21 марта, в день весеннего равноденствия, Солнце пересекает небесный экватор (склонение Солнца $\delta = 0^{\circ}$), переходит в северное небесное полушарие и с каждым днем отходит от небесного экватора, в связи с чем положительное склонение Солнца постепенно возрастает и поэтому увеличивается дневной путь Солнца над горизонтом, располагаясь над небесным экватором. Ко дню летнего солнцестояния 21—22 июня Солнце удаляется от небесного экватора на $23^{\circ}27'$ (склонение Солнца $\delta = +23^{\circ}27'$), его дневной путь наиболее продолжителен и занимает наивысшее положение над горизонтом, а затем склонение Солнца постепенно уменьшается, его дневной путь укорачивается, и 22—23 сентября оно опять пересекает небесный экватор, переходя из северного в южное небесное полушарие. Теперь склонение Солнца становится отрицательным, и дневное светило проходит свой суточный путь над горизонтом ниже небесного экватора, все время удаляясь от него, пока к дню зимнего солнцестояния 21—22 декабря не отойдет на $23^{\circ}27'$ (склонение Солнца $\delta = -23^{\circ}27'$), и полуденная высота Солнца станет наименьшей. После этого дня склонение Солнца снова возрастает, Солнце опять приближается к небесному экватору и в очередной день весеннего равноденствия вновь пересечет его и перейдет в северное небесное полушарие. Годовой цикл видимого движения Солнца окончен и далее снова повторяется в той же последовательности.

Итак, на протяжении года Солнце поочередно отходит от небесного экватора в обе стороны на одно и то же угловое расстояние, равное $23^{\circ}27'$, а это означает, что видимый годовой путь Солнца на небе представляет собой большой круг, пересекающийся с небесным экватором под тем же углом $\varepsilon = 23^{\circ}27'$. Этот

большой круг получил название эклиптики, происшедшее от греческого слова «эклипсис» — затмение, поскольку, как мы увидим дальше, солнечные и лунные затмения происходят при подходе Луны к эклиптике.

Эклиптика пересекается с небесным экватором в двух диаметрально противоположных точках, называемых точками равноденствий (рис. 8). В точке весеннего равноденствия, находящейся в созвездии Рыб

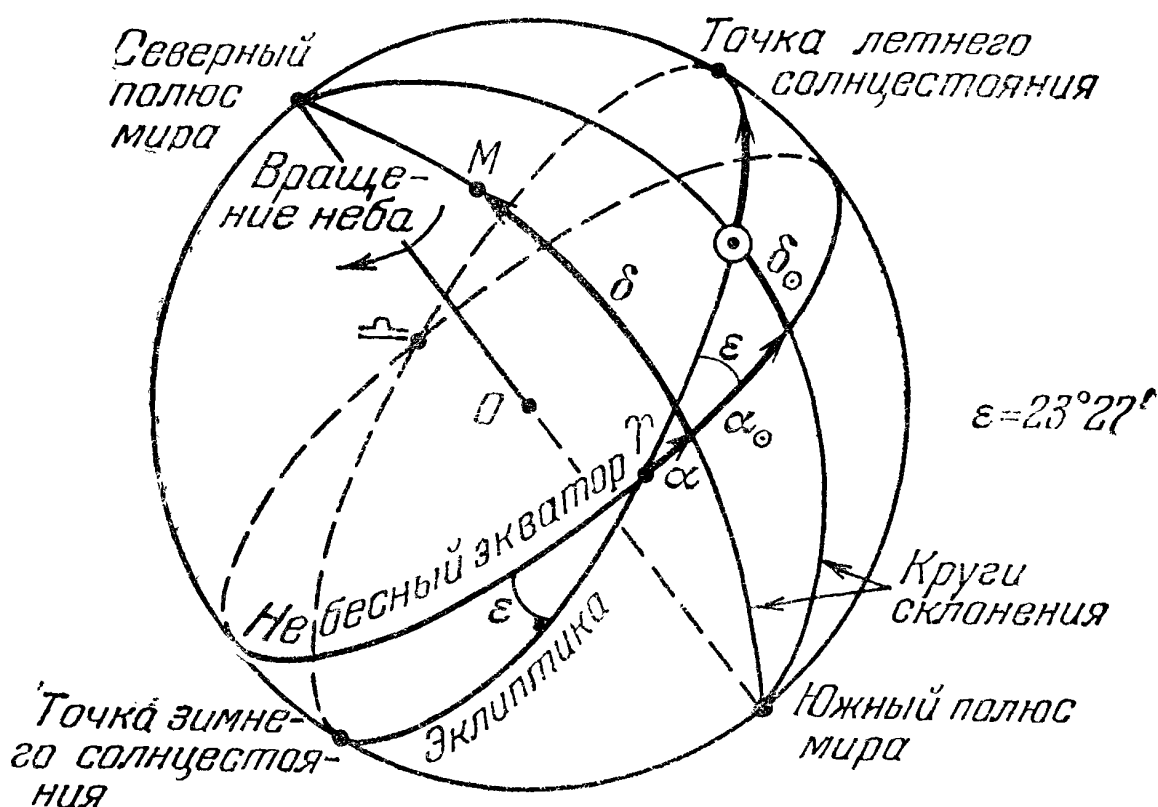


Рис. 8. Небесный экватор и эклиптика. γ — точка весеннего равноденствия; $\odot$ — Солнце и направление его годового движения; экваториальные координаты Солнца ($\alpha_{\odot}$ и $\delta_{\odot}$) и звезды M (α и δ).

и обозначаемой знаком γ , Солнце весной пересекает небесный экватор и переходит из южного небесного полушария в северное, а в точке осеннего равноденствия (знак $\simeq$), расположенной в созвездии Девы, Солнце через полгода возвращается в южное полушарие неба. У обеих этих точек склонение $\delta = 0^{\circ} 0'$. Точно посередине между точками равноденствий на эклиптике расположены точки солнцестояний, в которых Солнце достигает наибольшего удаления от небесного экватора: точка летнего солнцестояния находится в северном полушарии неба, в созвездии Близнецов, и имеет склонение $\delta = +23^{\circ} 27'$, а противоположная ей точка зимнего солнцестояния — в южном полушарии неба, в созвездии Стрельца, и ее склонение $\delta = -23^{\circ} 27'$ (см. рис. 8).

Видимое положение любого небесного светила, в том числе Солнца и Луны, определяется двумя величинами, называемыми небесными экваториальными координатами, аналогичными географическим координатам, — широте и долготе. Для этого через полюсы мира мысленно проводят большие круги, сходные с земными меридианами, но называют их кругами склонения (см. рис. 8). Одна экваториальная координата нам уже известна — это склонение (δ), показывающее угловое расстояние светила от небесного экватора. Другая экваториальная координата, аналогичная географической долготе, называется прямым восхождением (α) и отсчитывается от точки весеннего равноденствия (Υ) по небесному экватору всегда в одну сторону, с запада к востоку, до круга склонения светила. Прямое восхождение тоже может быть указано в градусах и минутах дуги, в пределах от 0° до 360° , но чаще всего оно выражается в единицах времени — в часах (ч), минутах (м) и секундах (с), из расчета, что $24^{\text{ч}} = 360^\circ$, $1^{\text{ч}} = 15^\circ$, $4^{\text{м}} = 1^\circ$, $1^{\text{м}} = 15'$ и $1^{\text{с}} = 15''$. Эта система единиц более удобна для расчетов времени наступления астрономических явлений. Таким образом, на протяжении года экваториальные координаты Солнца непрерывно изменяются в пределах: прямое восхождение α от $0^{\text{ч}}$ до $24^{\text{ч}}$ и склонение δ от $+23^\circ 27'$ до $-23^\circ 27'$.

Тут же следует оговорить, что экваториальных координат небесных светил непосредственно измерить нельзя, так как ни небесный экватор, ни точки эклиптики на небе ничем не отмечены. Однако обе координаты легко вычисляются по моменту времени и по измеренной высоте светила, когда оно пересекает небесный меридиан. По этим координатам положения звезд, небесного экватора и эклиптики наносятся на звездные карты.

Годовое движение Солнца по эклиптике не случайно названо видимым: в действительности это Земля обращается вокруг Солнца с годичным периодом, чему теперь у астрономии имеется множество доказательств. Нам же, не ощущающим движения Земли, кажется, что Солнце на протяжении года последовательно перемещается по 12 созвездиям, именуемым зодиакальными (от греческого «зоон» — животное или

«зодиакос» — звериный) потому, что большинство из них имеет наименования реальных и мифических живых существ, — это созвездия Рыб, Овна, Тельца, Близнецов, Рака, Льва, Девы, Весов, Скорпиона, Стрельца, Козерога и Водолея. Значит, истинный путь Земли в пространстве вокруг Солнца, называемый земной орбитой (от латинского слова *orbita* — колея, дорога), лежит в той же плоскости, что и эклиптика,

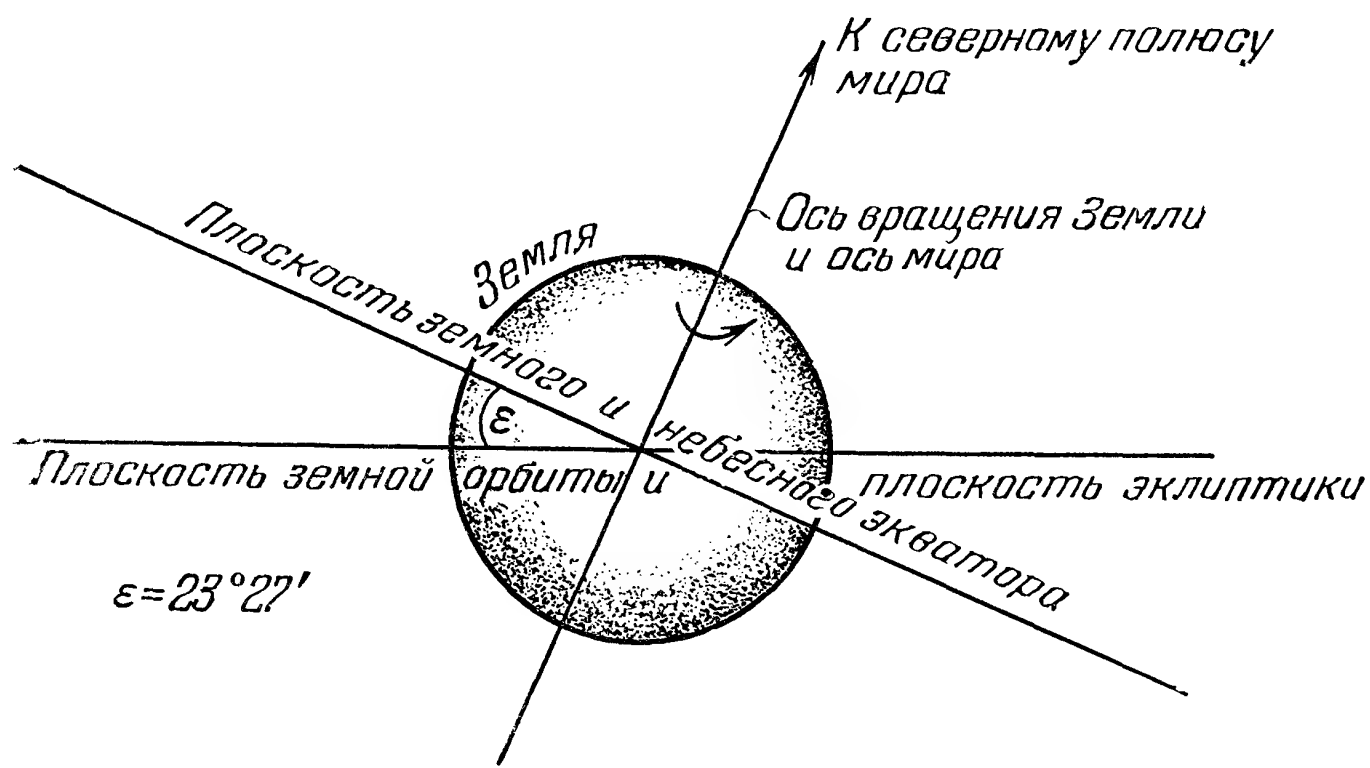


Рис. 9. Наклон земной оси и наклонение эклиптики.

и эта плоскость образует с плоскостью земного экватора угол в $23^{\circ} 27'$ (рис. 9). Так из наблюдений видимого годового движения Солнца установили наклон оси вращения Земли к плоскости ее орбиты, который теперь показывается на всех земных глобусах. Именно этот наклон земной оси и служит причиной наклонения эклиптики к небесному экватору на угол в $23^{\circ} 27'$. При ином наклоне земной оси эклиптика пересекалась бы с небесным экватором под другим углом, но тоже равным углу, образованному плоскостью земного экватора с плоскостью земной орбиты. Например, плоскость экватора планеты Марс образует с плоскостью ее орбиты угол в $24^{\circ} 48'$ и поэтому в марсианском небе эклиптика наклонена к небесному экватору под тем же углом в $24^{\circ} 48'$.

Как известно, вокруг Солнца движется не одна наша Земля, а целая семья небесных тел, одни из которых сходны с Землей, а другие резко от нее

отличаются своими физическими характеристиками. Девять больших шарообразных тел, сопоставимых по размерам с Землей, называются планетами (иногда — большими планетами), и в их число входит Земля, являющаяся третьей планетой по счету от Солнца. Ближе Земли вокруг Солнца движутся планеты Меркурий и Венера, а за Землей — планеты Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон. И если ближайшая к Солнцу планета Меркурий обращается вокруг него на среднем расстоянии в 58 млн. км за

88 суток, то наиболее далекой планете, Плутону, требуется на один оборот вокруг Солнца около 248 лет, так как она почти в 40 раз дальше от него, чем Земля.

Еще в 1608—1609 гг. выдающийся немецкий математик и астроном Иоганн Кеплер (1572—1630) установил, что планеты обращаются вокруг

Солнца по эллиптическим орбитам, и чем ближе планета к Солнцу, тем быстрее она движется. Земля не является исключением и тоже обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите. Эллипс (рис. 10) — это один из овалов, обладающий, в отличие от окружности, двумя взаимно перпендикулярными и различными по величине осями — большой ($AP = 2a$) и малой ($DE = 2b$). На большой оси, на равных расстояниях от центра (O) эллипса, имеются две точки (C и F), называемые фокусами, характерные тем, что сумма расстояний от них до любой точки эллипса есть величина постоянная и всегда равная длине большой оси, т. е.

$$r + r_1 = 2a.$$

В одном из фокусов эллиптической орбиты планеты находится Солнце (C — на рис. 10), так что расстояние планеты от него непрерывно меняется в определенных пределах, от наименьшего $q = CP$, до наи-

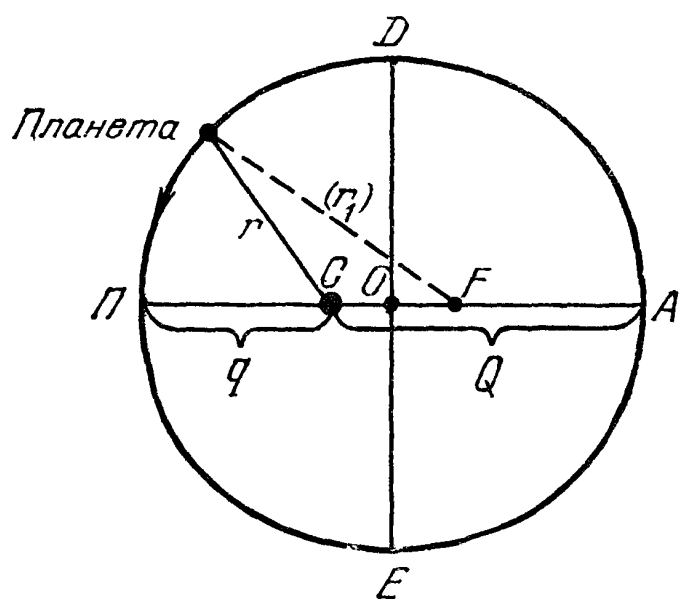


Рис. 10. Эллиптическая орбита планеты. C — Солнце в одном из фокусов орбиты

большого $Q = CA$. Так как на греческом языке «гелиос» означает Солнце, слово «пери» — близко или около, а слово «апо» — вдали, то любое произвольное расстояние от Солнца называется гелиоцентрическим, наименьшее расстояние (q) — перигельным расстоянием, а наибольшее (Q) — афелийным расстоянием, хотя правильнее было бы называть его апогельным. Соответственно и концевые точки большой оси орбиты называются перигелием (ближайшая точка, P) и афелием (наиболее удаленная точка, A). Очевидно, что среднее гелиоцентрическое расстояние планеты численно равно большой полуоси ($OP = OA = a$) ее орбиты, так как

$$a = \frac{q + Q}{2} = \frac{CP + CA}{2}.$$

Вытянутость эллиптической орбиты характеризуется отношением расстояния между фокусом и центром к длине большой полуоси, т. е. величиной

$$e = \frac{OC}{a},$$

называемой эксцентриситетом орбиты.

Легко видеть, что перигельное расстояние

$$q = a(1 - e),$$

а афелийное расстояние

$$Q = a(1 + e).$$

Большая полуось земной орбиты или, что одно и то же, среднее расстояние Земли от Солнца принимается за единицу измерений гелиоцентрических и межпланетных расстояний и поэтому именуется астрономической единицей (а. е.). Согласно радиолокационным измерениям, проведенным в 1961—1962 г. в СССР, США и Англии, астрономическая единица $a_0 = 1 \text{ а. е.} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ км}$ (149,6 млн. км).

В последующие годы такие измерения неоднократно уточнялись, и по их результатам XVI съезд Международного Астрономического союза, состоявшийся в Гренобле (Франция) в конце августа 1976 г., принял и утвердил новое значение астрономической единицы $a_0 = 1 \text{ а. е.} = 149\,597\,870 \text{ км}$. Однако для

приближенных расчетов вполне достаточно принимать $a_0 = 149,6 \cdot 10^6$ км, что и сделано в данной книге.

Движение Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите доказывается периодическим изменением в определенных пределах угловой скорости годового движения Солнца по эклиптике и видимых размеров его диска. Наибольший диаметр солнечного диска $D = 32' 35''$ бывает в самом начале января и в то же время угловая скорость Солнца по эклиптике составляет $61'$ в сутки. В самом же начале июля диаметр солнечного диска уменьшается до $d = 31' 31''$, а угловая скорость — до $57'$ в сутки. Значит, в начале января Земля ближе всего к Солнцу и поэтому движется быстрее, чем в начале июля, когда ее гелиоцентрическое расстояние — наибольшее.

По этим данным нетрудно вычислить эксцентриситет земной орбиты и пределы изменения гелиоцентрического расстояния Земли. В самом деле, так как размеры солнечного диска малы, то они обратно пропорциональны расстояниям, т. е.

$$\frac{D}{d} = \frac{Q}{q} = \frac{a_0 (1 + e)}{a_0 (1 - e)},$$

или

$$\frac{1 + e}{1 - e} = \frac{32' 35''}{31' 31''} = \frac{1955''}{1891''} = 1,0339,$$

откуда эксцентриситет земной орбиты $e = 0,0167$ или приближенно $e = 0,017$.

Используя значение эксцентриситета земной орбиты, можно по формулам, приведенным на стр. 45, определить пределы изменения гелиоцентрического расстояния Земли при ее обращении вокруг Солнца: в самом начале января это расстояние бывает наименьшим

$$q = a_0 (1 - e) = 1 \cdot (1 - 0,017) = 0,983 \text{ а. е.}$$

или

$$q = 0,983 \cdot 149,6 \cdot 10^6 = 147,1 \text{ млн. км,}$$

а в самом начале июля — наибольшим

$$Q = a_0 (1 + e) = 1 \cdot (1 + 0,017) = 1,017 \text{ а. е.}$$

или

$$Q = 1,017 \cdot 149,6 \cdot 10^6 = 152,1 \text{ млн. км.}$$

На среднем же расстоянии $a_0 = 149,6$ млн. км от Солнца Земля находится в начале апреля и в начале октября.

Свой годовой путь вокруг Солнца Земля проходит за промежуток времени $\tau_0 = 365,25$ суток, а так как в каждых сутках содержится 86 400 сек, то $\tau_0 = 365,25 \cdot 86\,400 = 31,56 \cdot 10^6$ сек. Отсюда нетрудно вычислить среднюю скорость движения Земли по своей орбите или, что одно и то же, ее среднюю орбитальную скорость

$$V_0 = \frac{2\pi a_0}{\tau_0} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 149,6 \cdot 10^6 \text{ км}}{31,56 \cdot 10^6 \text{ сек}} = 29,8 \text{ км/сек},$$

т. е. приблизительно можно принимать $V_0 = 30$ км/сек.

Но поскольку Земля обращается вокруг Солнца не по окружности, а по эллиптической орбите, то и скорость движения Земли не остается постоянной, а тоже несколько меняется: в начале января, когда Земля проходит перигелий, ее скорость возрастает до 30,3 км/сек, а в начале июля, при прохождении афелия, уменьшается до 29,3 км/сек.

Таким образом, Земля проходит в среднем за 1 час (3600 сек) $29,8 \cdot 3600 = 107\,280$ км, а за сутки — 2 574 720 км. Вблизи же перигелия часовой путь Земли увеличивается до $30,3 \cdot 3600 = 109\,080$ км, а суточный путь — до 2 617 920 км; зато вблизи афелия часовой путь сокращается до $29,3 \cdot 3600 = 105\,480$ км и суточный — до 2 531 520 км.

Так из наблюдений видимого годового движения Солнца астрономы получили сведения об истинном движении Земли и ее орбите.

3. ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ И ЕЕ ФАЗЫ

В своем вечном движении вокруг Солнца Земля не одинока, ее сопровождает единственный естественный спутник Луна — самое близкое к Земле небесное тело. Уже со времен великого итальянского физика Г. Галилея (1564—1642), впервые направившего в 1609 г. свой несовершенный телескоп на Луну, стало ясно, что спутник Земли похож на нее и тоже является

холодным темным шаром с твердой поверхностью, видимым лишь в солнечном освещении.

В наше время Луна хорошо изучена всеми доступными науке и технике средствами. Уже обычные фотографии показывают обилие на ее поверхности горных хребтов и пиков, огромное количество крупных



Рис 11. Луна в фазе первой четверти (вид в телескоп).

и мелких кратеров, обширных долин, затянутых затвердевшей лавой и называемых морями и озерами, хотя на Луне вода совершенно отсутствует (рис. 11). Луна лишена и атмосферы, из-за чего четко видны не только края ее диска и рельеф ее поверхности, но и резкие тени, отбрасываемые освещенными Солнцем лунными горами.

С осени 1959 г. началось активное изучение Луны сначала советскими, а вслед затем и американскими автоматическими станциями и искусственными спутниками Луны. Фотография рельефа

одного из участков лунной поверхности, полученная искусственным спутником с высоты 25 км над нею, показана на рис. 12. Затем настала очередь исследования Луны советскими самоходными аппаратами-лунноходами (1970—1973), управляемыми с Земли, и американскими экспедициями (1969—1972). Доставленный на Землю лунный грунт изучен в лабораториях. К сожалению, в рамках нашего повествования мы не можем даже вкратце изложить результаты этих исследований и предлагаем читателю интересную книгу Ф. Ю. Зигеля «Сокровища звездного неба» (издание третье, «Наука», 1976), в которой

подробно описана лунная поверхность и содержатся сведения о ее изучении за последние годы. Мы же переходим к описанию движения Луны.

Вместе со звездами Луна восходит над горизонтом в восточной стороне неба, постепенно поднимается и смещается в сторону южной его области, а достигнув в ней наибольшей высоты, медленно опускается к западной стороне горизонта и наконец исчезает за ним. Это движение Луны вместе с небом с востока к западу, аналогичное суточному движению звезд и Солнца,

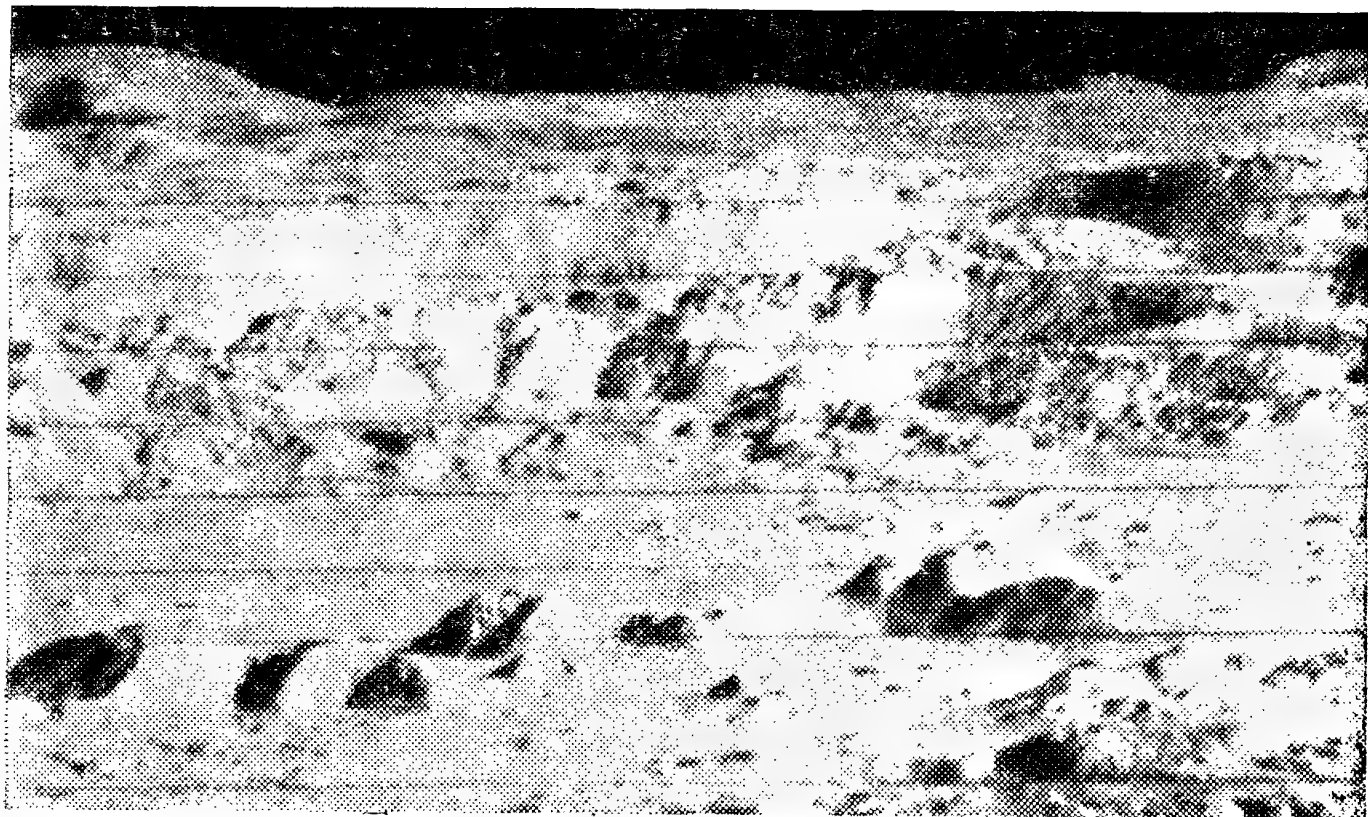


Рис. 12. Фотография кратера Коперник с высоты 25 км над ним.

объясняется вращением Земли вокруг своей оси. Но, наверное, многие читатели замечали, что Луна восходит и заходит не в одно и то же время суток, а ежедневно запаздывает на небольшой промежуток времени, близкий к 1 часу. Присмотревшись внимательно к положению Луны на звездном небе, нетрудно заметить, что она, подобно Солнцу, перемещается на фоне звезд с запада к востоку, но значительно быстрее Солнца: на протяжении одного часа примерно на величину своего видимого (углового) диаметра, равную $0^{\circ},5$, а за сутки — приблизительно на $13^{\circ},2$ и поэтому сравнительно быстро переходит из одного зодиакального созвездия в другое, ни в одном не задерживаясь более двух-трех суток.

Наблюдения показывают, что Луна перемещается на фоне звезд по большому кругу — лунному пути, который, подобно эклиптике, тоже пролегает по зодиакальным созвездиям, но не совпадает, а пересекается с нею под углом в $5^{\circ}09'$ (изменяющимся от $4^{\circ}59'$ до $5^{\circ}19'$) в двух диаметрально противоположных точках, называемых лунными узлами и отстоящих друг от друга на расстоянии в 180° . В одном из них, получившем название восходящего узла, Луна в своем движении пересекает эклиптику, поднимается над ней в северном направлении и постепенно удаляется от нее на $5^{\circ}09'$, а затем приближается к ней, в противоположном, нисходящем узле снова ее пересекает и отходит к югу на то же расстояние.

Тут же отметим, что в астрономии сохранились многие обозначения (знаки), введенные еще в глубокой древности, и, в частности, знаки для лунных узлов: восходящий лунный узел обозначается знаком Ω , изображающим дракона, набрасывающегося на Солнце и вызывающего, по древним поверьям, его затмение, а нисходящий лунный узел — перевернутым знаком Υ .

Свой путь по небу вокруг Земли в направлении с запада к востоку Луна совершает за период времени $T = 27,32$ суток, называемый звездным, или сидерическим месяцем. Такое название этот период получил от латинского слова *sideralis* — звездный и от греческого слова «менискос» — лунный серп, так как по истечении этого промежутка времени Луна снова проходит на небе в зоне тех же самых звезд, а еще в древние времена месяцем считался промежуток времени между одинаковыми серповидными фазами Луны. И до сих пор периоды времени, связанные с движением Луны, называются месяцами, но только, как мы увидим дальше, они несколько различаются по длительности и поэтому получают дополнительные наименования. Здесь же необходимо отметить, что звездный месяц представляет собой период реального обращения Луны вокруг Земли в пространстве.

Если бы Луна двигалась равномерно по небесному экватору, пересекающемуся с горизонтом в точках востока и запада, то она всегда восходила бы и заходила

соответственно в этих точках, поднималась над горизонтом на одну и ту же наибольшую высоту, а ежедневное запаздывание ее восхода и захода составляло бы 52 минуты, т. е. ровно столько, сколько требуется Земле, чтобы повернуться вокруг оси на те 13° , на которые Луна смещается к востоку за сутки. Но лунный путь наклонен к эклиптике на $5^\circ 09'$, а сама эклиптика — на $23^\circ 27'$ к небесному экватору, и поэтому на протяжении половины звездного месяца склонение Луны может изменяться от $+28^\circ 36'$ до $-28^\circ 36'$, т. е. больше, чем у Солнца за полгода. При большом положительном склонении Луна восходит на северо-востоке, ее суточный путь над горизонтом очень высок и долог, как у Солнца в летнее время, и заходит она на северо-западе. Когда же Луна находится в южном небесном полушарии и ее отрицательное склонение значительно по величине, то она восходит на юго-востоке и заходит на юго-западе, а ее путь над горизонтом так же низок и короток, как зимний дневной путь Солнца. К тому же Луна движется неравномерно, периодически несколько ускоряя и замедляя свое движение. Отсюда и ежедневное запаздывание ее восхода и захода неодинаково по продолжительности и на протяжении месяца может изменяться от 12 минут до 1,5 часа, что в среднем составляет 52 минуты.

Итак, непосредственно из наблюдений следует, что Луна обращается вокруг Земли по большому кругу — лунному пути, с периодом в 27,32 суток, причем ее движение неравномерное. Теперь предстоит выяснить реальный путь Луны в пространстве. Поскольку Луна всегда сопровождает Землю в ее годовом движении вокруг Солнца, то она действительно является спутником нашей планеты, но обращается ли она вокруг Земли или движется как-то иначе, — на этот вопрос можно, оказывается, ответить двояко.

Многократные, в том числе и радиолокационные измерения расстояния до Луны показали, что оно не имеет строго определенного значения, а периодически в правильной последовательности изменяется в определенных пределах. При каждом своем обороте Луна то приближается к Земле, то несколько удаляется от нее, и с такой же правильностью возрастает и

уменьшается скорость движения Луны в пространстве. Следовательно, можно утверждать, что Луна обращается вокруг Земли с запада к востоку по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой расположена наша планета (рис. 13). Плоскость лунной орбиты в пересечении с небом образует большой круг — лунный путь, а плоскость земной орбиты, как нам уже известно, пересекается с небом по эклиптике, и так как в пространстве первая плоскость образует со второй

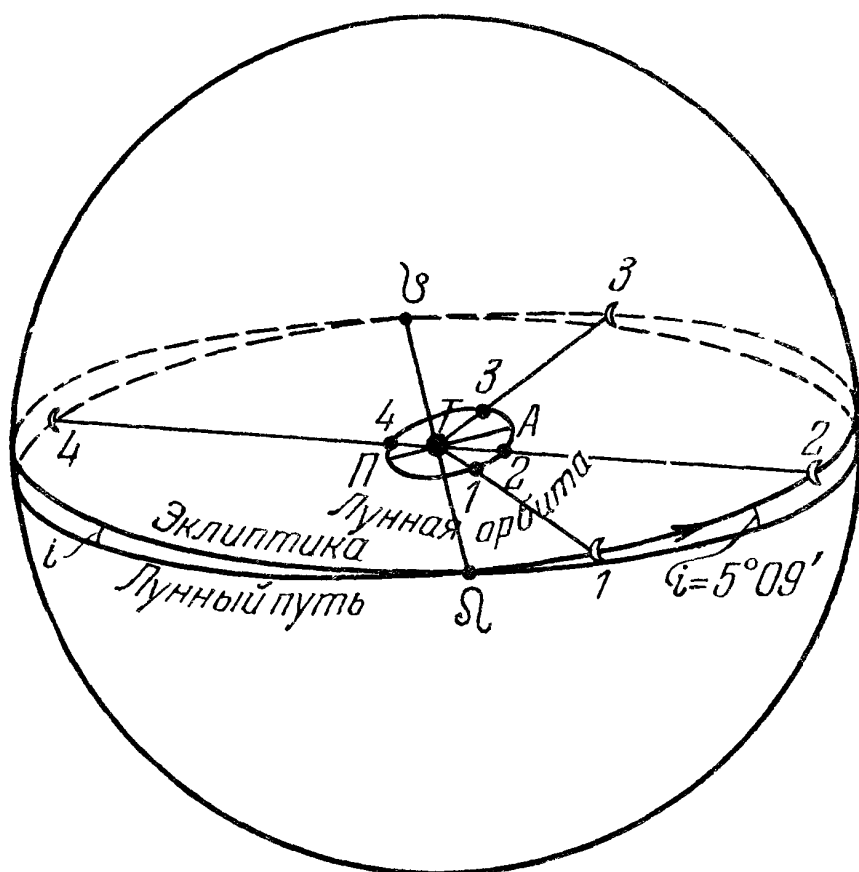


Рис. 13. Лунная орбита и лунный путь. T — Земля; $\bullet$ — положения Луны на орбите; $\odot$ — видимые положения Луны на небе; Ω — восходящий узел; Υ — нисходящий узел.

угол в $5^\circ 09'$, то поэтому и лунный путь наклонен к эклиптике под таким же углом. Обе эти плоскости пересекаются друг с другом по прямой линии, проходящей через центр Земли и называемой линией узлов лунной орбиты, и как раз на этой линии лежат лунные узлы в диаметрально противоположных направлениях от Земли, т. е. на 180° друг от друга.

В греческом языке Земля именуется словом «Гея», и от этого слова произошли следующие названия (см. рис. 13) *): геоцентрическое расстояние — расстояние от Земли; перигей (Π) — ближайшая к Земле точка

*) Такие же названия используются для орбит искусственных спутников Земли.

лунной орбиты; перигейное расстояние (q) — расстояние перигея от Земли; апогей (A) — наиболее удаленная от Земли точка лунной орбиты; апогейное расстояние (Q) — геоцентрическое расстояние апогея.

Перигей и апогей лежат на большой оси лунной орбиты, а средним геоцентрическим расстоянием Луны является большая полуось ее орбиты

$$a = \frac{q + Q}{2}.$$

И вот выяснилось, что при каждом обороте вокруг Земли Луна приближается к ней и удаляется от нее на неодинаковые расстояния: перигельное расстояние Луны систематически изменяется в пределах от 356 410 км до 369 960 км, а апогейное расстояние — от 404 180 км до 406 740 км. Поэтому лунный диск, диаметр которого близок к $0^{\circ},5$, несколько меняет свои размеры: когда Луна проходит перигей, ее угловой диаметр может быть от $33',5$ до $32',5$, а при прохождении апогея — от $29',6$ до $29',3$. Наиболее часто перигельное расстояние Луны $q = 363\,300$ км, а апогейное расстояние $Q = 405\,500$ км, и следовательно, среднее геоцентрическое расстояние (или большая полуось лунной орбиты) $a = 384\,400$ км, при котором диаметр лунного диска $d = 31',1$.

Эти сведения позволяют по правилам тригонометрии вычислить линейный диаметр Луны:

$$D = a \sin d = 384\,400 \cdot \sin 31',1 = \\ = 384\,400 \cdot 0,00904 = 3474 \text{ км},$$

или 0,272 экваториального диаметра Земли, равного 12 756 км, т. е. приближенно можно считать, что лунный диаметр в четыре раза меньше земного (точнее, в 3,67 раза), а объем Луны меньше земного примерно в 50 раз.

По тем же данным нетрудно найти среднее значение эксцентриситета (e) лунной орбиты, помня, что $q = a(1 - e)$; тогда

$$e = 1 - \frac{q}{a} = 1 - \frac{363\,300}{384\,400} = 0,0549 \approx 0,055,$$

т. е. лунная орбита значительно более вытянута, нежели орбита Земли. Подобно перигейному и апогейному

расстоянию, эксцентриситет лунной орбиты тоже несколько меняется в обе стороны от его среднего значения, как, впрочем, и большая полуось орбиты, длина которой периодически то увеличивается, то уменьшается приблизительно на 2000 км.

Более того, наблюдения показывают, что сам лунный путь не занимает постоянного положения на небе, а сравнительно быстро сдвигается с востока к западу, и поэтому за сидерический месяц лунные узлы перемещаются по эклиптике в том же направлении, т. е. навстречу движению Луны, на $1^{\circ},5$ (на три диаметра лунного диска!), а за год — на $19^{\circ},3$. Это движение лунных узлов по эклиптике с востока к западу называется отступлением узлов, потому что в астрономии прямым движением считается движение в восточном направлении. Отступление лунных узлов объясняется поворотом в пространстве самой плоскости лунной орбиты, вследствие чего поворачивается ее линия узлов, и полный поворот на 360° по эклиптике лунные узлы завершают за период времени $T_y = \frac{360^{\circ}}{19^{\circ},3} = 18,6$ года,

или 18 лет 7 месяцев. Именно через этот промежуток времени плоскость лунной орбиты в пространстве и лунный путь на небе занимают прежнее положение. Наконец и сама лунная орбита не занимает в своей плоскости неизменного направления, а быстро поворачивается с запада к востоку почти на 41° за год (!) и полный поворот на 360° завершает примерно за 8,8 года.

Таким образом, движение Луны в пространстве очень «запутанно» и сложно, и тем не менее, для определенности и удобства вычислений видимого положения Луны астрономы считают лунную орбиту эллиптической, но с непрерывно изменяющимися элементами эллипса. Такая изменяющаяся орбита называется возмущенной, а ее отклонения от неизменного эллипса — возмущениями.

В чем же причина возмущений лунной орбиты, что ее возмущает? Не касаясь иных, менее существенных причин, укажем лишь главную: ею является Солнце, которое своим мощным притяжением воздействует на Луну и заставляет ее в своем движении уклоняться от того эллиптического пути, по которому она дол-

жна двигаться под действием только земного притяжения.

Читатель вправе спросить: а почему все же Луна обращается вокруг Земли, а не Земля вокруг Луны?

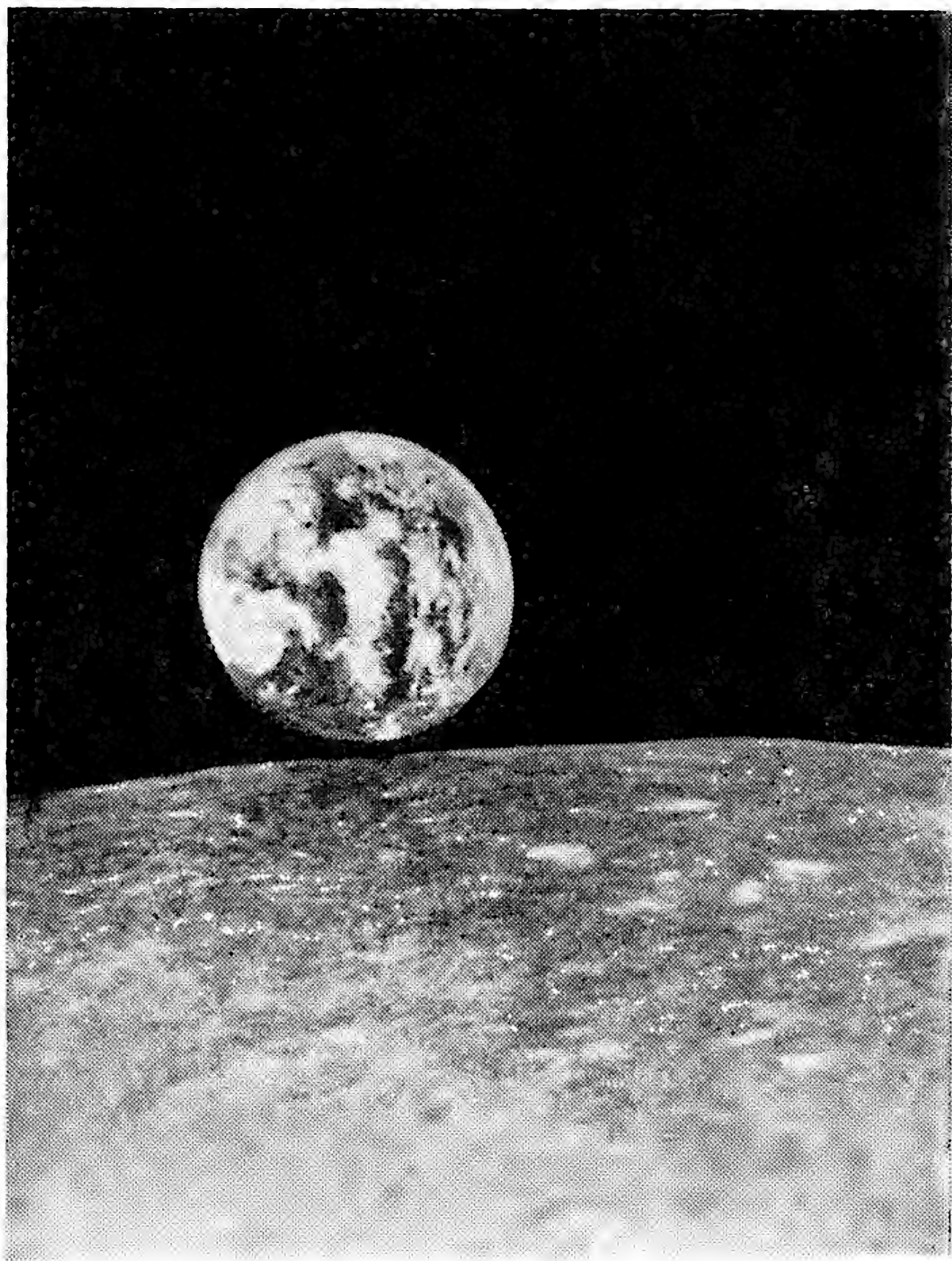


Рис 14. Земля в небе Луны (снимок получен советской станцией «Зонд-7»)

Ведь всякое движение относительно, и с лунной поверхности тоже видно перемещение Земли на фоне звездного неба (рис. 14). Совершенно верно,

относительно, но всегда тело меньшей массы обращается вокруг более массивного тела — таков неизменный закон природы. А массу Луны легко определить, если воспользоваться законом, известным в астрономии под названием третьего обобщенного закона Кеплера. Этот закон был выведен выдающимся английским ученым Исааком Ньютоном (1643—1727).

Представим себе, что какое-то небесное тело, масса которого m_1 , обращается с периодом T_1 по эллиптической орбите с большой полуосью a_1 вокруг более массивного небесного тела, имеющего массу M_1 . Вокруг же другого массивного тела с массой M_2 движется спутник с массой m_2 по эллиптической орбите с большой полуосью a_2 и периодом обращения T_2 . Тогда, согласно третьему обобщенному закону Кеплера,

$$\frac{T_2^2 (M_2 + m_2)}{T_1^2 (M_1 + m_1)} = \frac{a_2^3}{a_1^3}.$$

Применим этот закон к определению массы Луны M_2 , в сравнении с массой Земли M_1 , для чего воспользуемся сведениями о полетах искусственных спутников вокруг обоих этих тел. Так, советский искусственный спутник Земли «Молния-1», запущенный 14 октября 1965 г., обращался вокруг нее с периодом $T_1 = 11^{\text{ч}}59^{\text{м}} = 719^{\text{м}}$ по эллиптической орбите с большой полуосью $a_1 = 26\,600$ км; советский искусственный спутник «Луна-12», выведенный 25 октября 1966 г. на окололунную орбиту с большой полуосью $a_2 = 2660$ км, обращался вокруг Луны с периодом $T_2 = 3^{\text{ч}}25^{\text{м}} = 205^{\text{м}}$.

Подставляя эти данные в формулу третьего закона Кеплера и помня, что массы искусственных спутников ничтожно малы в сравнении с массами Земли и Луны (т. е. $m_1 = m_2 = 0$), получим:

$$\frac{M_2}{M_1} = \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^3 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{2660}{26600}\right)^3 \cdot \left(\frac{719}{205}\right)^2 = \frac{1}{81,3},$$

т. е. масса Луны меньше массы Земли примерно в 81 раз, и поэтому именно Луна обращается вокруг Земли, являясь ее естественным спутником.

Читатель, наверное, не забыл упоминания о каком-то ином возможном движении Луны, отли-

чающемся от обращения вокруг Земли. Так вот, чтобы вскрыть характер этого движения, достаточно подсчитать среднюю скорость движения Земли вокруг Солнца и среднюю скорость движения Луны относительно Земли и Солнца. Скорость относительно Солнца называется гелиоцентрической скоростью, а скорость относительно Земли — геоцентрической скоростью.

Средняя гелиоцентрическая, или орбитальная, скорость Земли, $V_0 = 30$ км/сек нами уже найдена

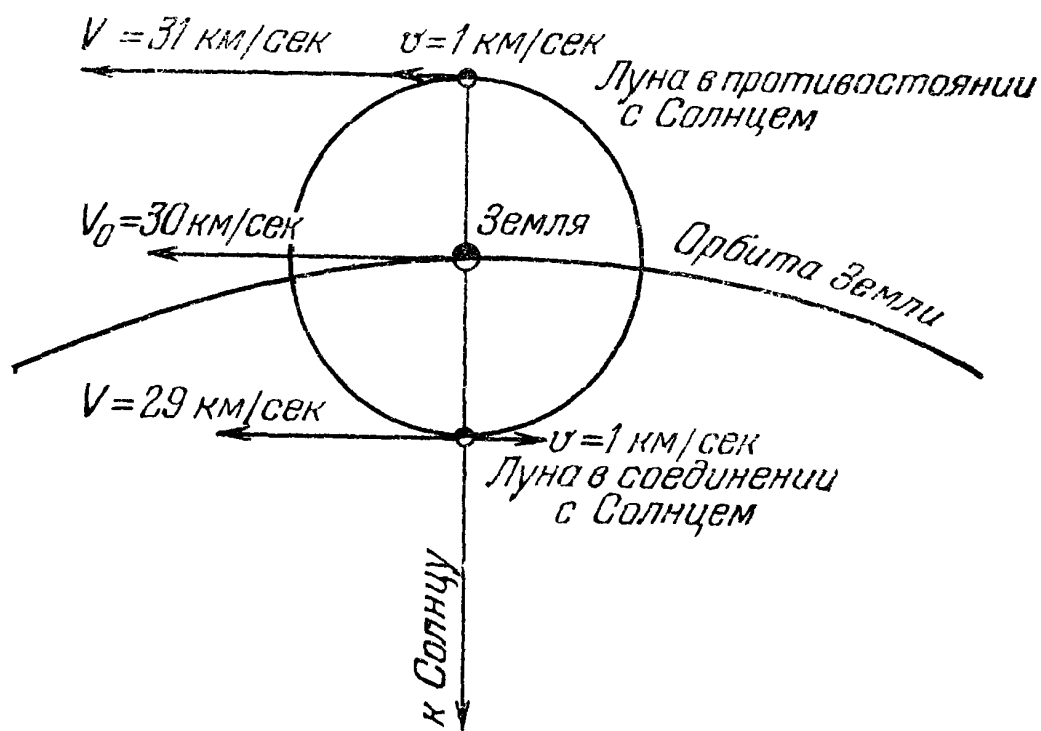


Рис. 15. Геоцентрическая (v) и гелиоцентрическая (V) скорость Луны.

(см. стр. 47). Аналогично подсчитывается геоцентрическая скорость Луны по ее среднему геоцентрическому расстоянию $a = 384\,400$ км и звездному периоду обращения $T = 27,32$ суток $= 23,60 \cdot 10^5$ сек, что дает

$$v = \frac{2\pi a}{T} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 384,4 \cdot 10^3}{23,60 \cdot 10^5} = 1,02 \text{ км/сек}$$

или около $v = 1$ км/сек.

Коль скоро Луна значительно ближе к Земле, чем Солнце, а именно в 390 раз, то она при своем обращении периодически проходит как между Солнцем и Землей, так и за земной орбитой (рис. 15). Положение Луны, при котором она видна с Земли в направлении, прямо противоположном Солнцу,

получило название противостояния Луны, а положение, совпадающее с направлением к Солнцу, названо ее соединением с Солнцем. Во время противостояний, когда Луна движется за земной орбитой, ее геоцентрическая скорость $v = 1$ км/сек направлена в ту же сторону, что и скорость Земли $V_0 = 30$ км/сек и поэтому гелиоцентрическая скорость Луны $V = V_0 + v = 31$ км/сек; следовательно, Луна и Земля движутся вокруг Солнца в одном направлении. И хотя во время соединений геоцентрическая скорость Луны противоположна орбитальной скорости Земли, все же гелиоцентрическая скорость Луны $V = V_0 - v = 29$ км/сек опять-таки совпадает по направлению со скоростью Земли, т. е. оба небесных тела все время обращаются вокруг Солнца в прежнем направлении.

Таким образом, вполне возможно считать, что Луна движется не вокруг Земли, а вместе с нею и подобно ей обращается вокруг Солнца по своей гелиоцентрической орбите, несколько отличающейся от земной орбиты, и поэтому следует рассматривать Луну не только как спутника Земли, сопровождающего ее в стремительном полете вокруг Солнца, но и как полноправного члена двойной планеты «Земля — Луна». Мы вправе считать Землю и Луну двойной планетой, ибо масса Луны лишь в 81 раз меньше земной массы, в то время как у спутников других планет подобное различие составляет от тысяч раз до сотен миллиардов.

Представим себе, что мы умчались далеко от Земли в сторону Солнца и оттуда наблюдаем нашу планету с ее спутником. Тогда, на фоне темного звездного неба мы увидим два очень близко расположенных друг к другу движущихся звездообразных светила, одно из которых голубоватое и такое же яркое, как планета Венера в небе Земли, а другое — желтое и почти в 80 раз более слабое, т. е. сходное по цвету и блеску с Проционом, главной звездой созвездия Малого Пса. Яркое голубоватое светило — это Земля, а более слабое и желтое — ее спутник Луна.

Но нам не удастся обнаружить обращения Луны вокруг Земли. Мы увидим, как оба светила всегда

двигаются по небу в одном прямом направлении, но периодически Луна, ускоряя свое движение, заходит за Землю, затем опережает ее и уходит немного вперед, далее замедляет движение, и перемещаясь в том же направлении перед Землей, настолько же отстает от нее, а вслед за тем снова догоняет и заходит за нее. Следовательно, мы вправе утверждать, что Луна подобно Земле обращается вокруг Солнца, т. е. движется по гелиоцентрической орбите, которую возмущает уже не Солнце, а Земля.

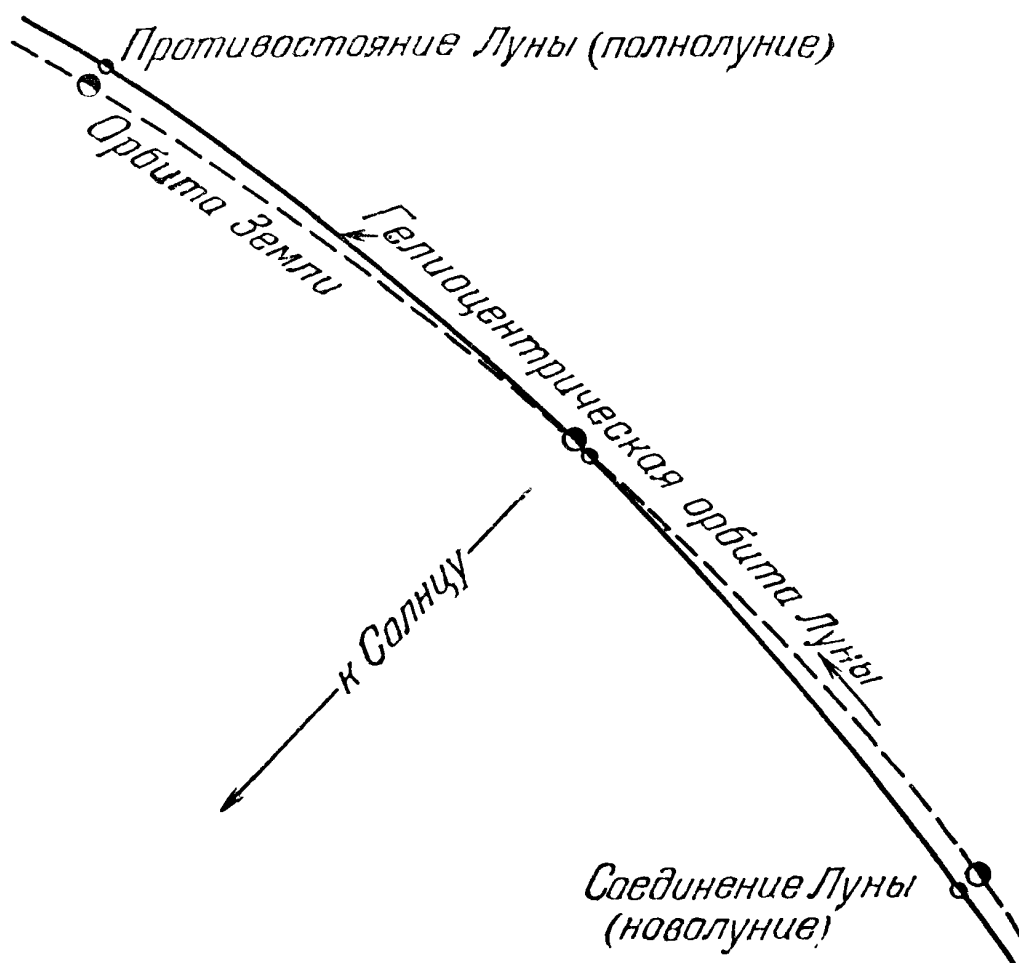


Рис. 16 Гелиоцентрическая орбита Луны.

Гелиоцентрическая орбита Луны всегда направлена вогнутостью к Солнцу (рис. 16), близка по расположению и форме к земной орбите, но все же отличается от эллиптической из-за возмущающего воздействия Земли. Образно говоря, Земля своим тяготением то разгоняет Луну, заставляя ее обгонять себя за своей орбитой, то, наоборот, тормозит ее движение, и Луна, несколько уменьшая скорость, снова отстает от Земли, проходя уже внутри земной орбиты. Наглядной моделью такого обращения может быть совместное движение двух автомобилей по периферии площади вокруг ее центра. Представим

себе, что первый автомобиль объезжает площадь по окружности со скоростью в 30 км/час, а второй автомобиль, всегда находясь вблизи первого, совершает аналогичный путь с переменной скоростью от 29 км/час до 31 км/час и притом так, что отстает от первого автомобиля внутри его траектории, а обгоняет — за нею. Тогда путь второго автомобиля, хотя и близок к окружности, все же отличается от нее, а наблюдатель, находящийся в первом автомобиле, видя, как второй автомобиль последовательно проходит со всех сторон от него, вправе утверждать, что этот автомобиль является спутником первого и обращается вокруг него со скоростью $v = 31 \text{ км/час} - 30 \text{ км/час} = 1 \text{ км/час}$. В этом и проявляется относительность движения.

Итак, мы убедились, что движение Луны очень сложно и его можно рассматривать двояко, как вокруг Солнца, так и вокруг Земли, но коль скоро мы видим, что Луна на протяжении сидерического месяца обходит Землю, то проще всего считать ее движущейся вокруг Земли по эллиптической орбите, возмущаемой солнечным притяжением, т. е. по той орбите, о которой рассказано на стр. 52—56.

Но движение по эллиптической орбите не может быть равномерным, а всегда происходит с переменной скоростью. Подобным образом движется и Луна: как мы видели, ее скорость на среднем геоцентрическом расстоянии или, другими словами, средняя геоцентрическая скорость составляет 1,02 км/сек, но по мере приближения Луны к Земле скорость Луны постепенно возрастает и в перигее достигает почти 1,08 км/сек, а затем, с удалением Луны от Земли, снова уменьшается и в апогее снижается до 0,97 км/сек.

Так как тяготение между телами взаимно, то в своем движении вокруг Солнца Земля тоже испытывает со стороны Луны небольшие возмущения, которые малы именно потому, что масса Луны в 81 раз меньше массы Земли, но все же под их воздействием наша планета слегка уклоняется в обе стороны от эллиптической орбиты. Но такие незначительные отклонения совершенно не существенны для правильных представлений о движении Земли вокруг Солнца.

С Земли видно только одно полушарие Луны, всегда обращенное к нашей планете. Создается впечатление, будто бы Луна, в отличие от Земли, не вращается вокруг своей оси. Но это впечатление ошибочно: если бы Луна не вращалась, то с Земли поочередно были бы видны оба ее полушария, в чем легко убедиться, обводя вокруг себя невращающийся шаровидный предмет. Если же медленно поворачивать этот предмет вокруг его оси в направлении обвода и с тем же периодом, то будет видно только одно его полушарие.

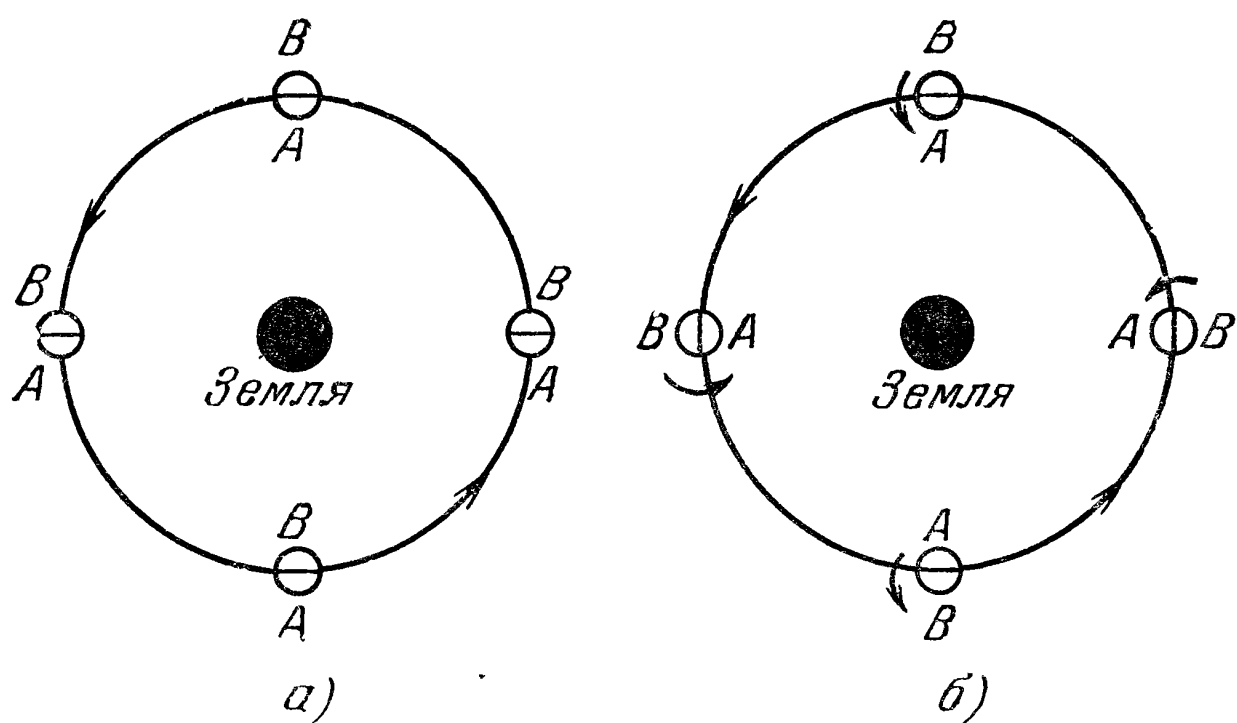


Рис. 17. Видимость с Земли поверхности Луны при отсутствии ее вращения (а) и при синхронном вращении (б).

Эти объяснения могут быть легко проиллюстрированы. На рис. 17, а изображены четыре положения Луны относительно Земли в предположении, что вращение Луны вокруг оси отсутствует. В этом случае лунные полушария, обозначенные буквами А и В, всегда обращены в пространстве в неизменных направлениях и, следовательно, поочередно обозримы с Земли. При вращении же Луны вокруг оси с тем же периодом, за который Луна обходит Землю (см. рис. 17, б) одно лунное полушарие (А) всегда обращено к Земле, а второе (В) отвернуто от нее и никогда с нее не видно. Луна именно поэтому и обращена к Земле одним своим полушарием, что медленно вращается вокруг оси в направлении своего движения вокруг Земли (с запада к востоку) с периодом,

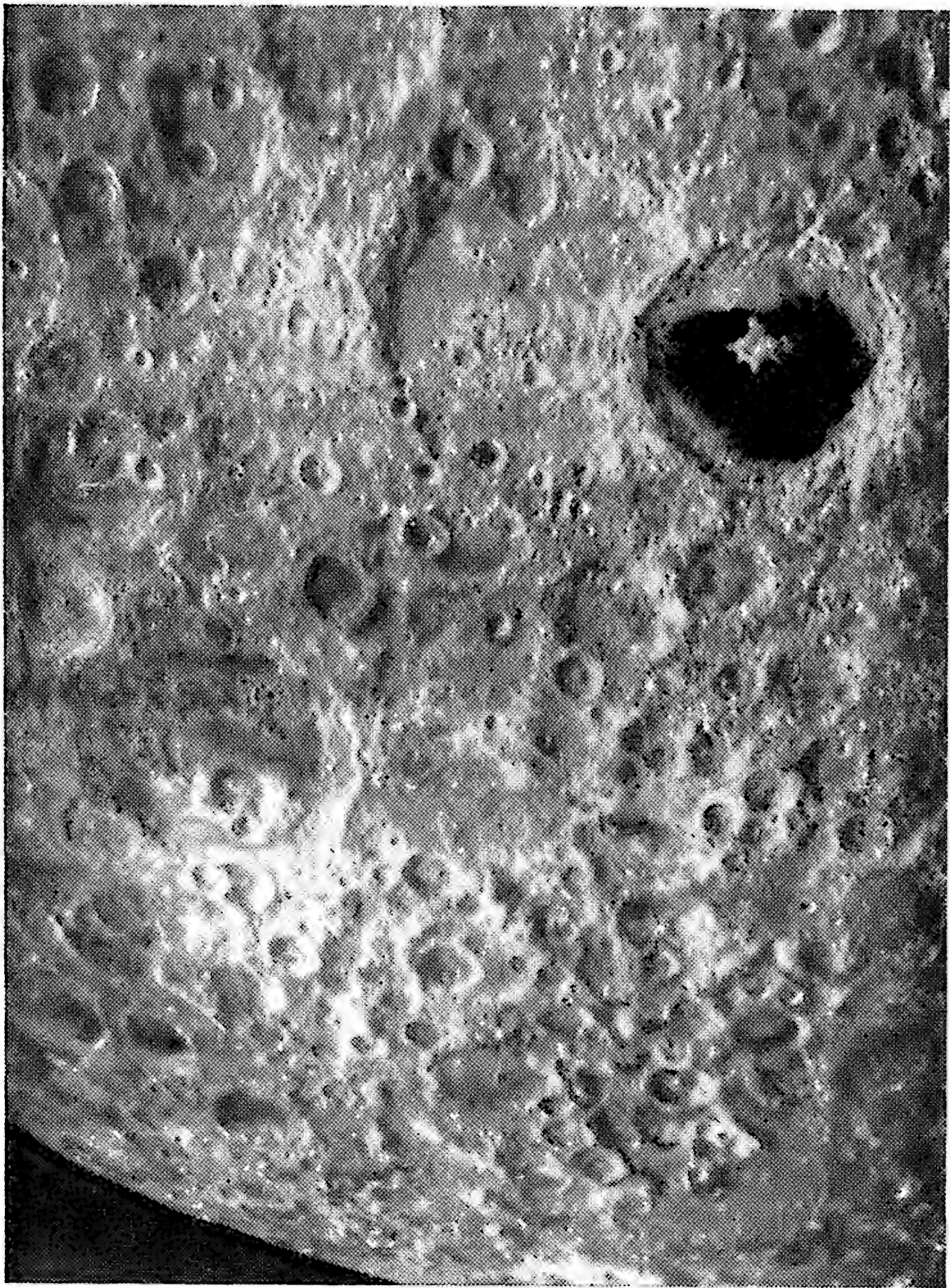


Рис. 18. Фотография участка невидимого полушария Луны.

равным звездному, или сидерическому, месяцу. Другими словами, периоды вращения Луны и ее обращения вокруг Земли одинаковы. Такое вращение называется синхронным.

Невидимое, или обратное, лунное полушарие сейчас хорошо изучено по фотографиям, полученным советскими и американскими лунными станциями. Одна из таких фотографий воспроизводится на рис. 18.

Всем хорошо известно изменение вида Луны — от тонкого серпа до полного диска и снова к тонкому серпу. Вид Луны называется лунной фазой, от греческого слова «фазис» — проявление. Обращаясь вокруг Земли, Луна последовательно занимает различные положения относительно Солнца, и так как с Земли видна только освещенная часть лунного шара, то происходит смена лунных фаз. Поэтому, более точно, лунная фаза представляет собой видимую в солнечном освещении часть лунного диска и определяется отношением наибольшей ширины (b) этой части к его диаметру (d), т. е. фаза $\varphi = b/d$ и математически всегда выражается десятичной дробью с точностью, как правило, до 0,01 (рис. 19).

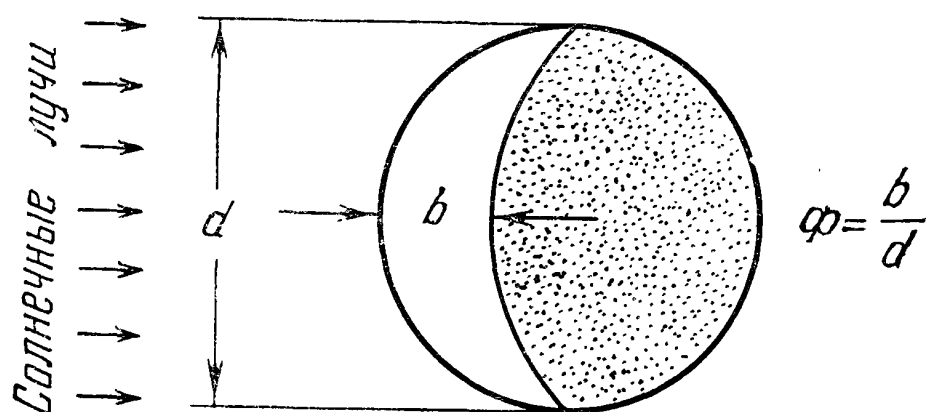


Рис. 19. Лунная фаза.

На рис. 20 показаны различные положения Луны на своей орбите и рядом — ее фазы, видимые с Земли. Когда Луна проходит между Землей и Солнцем (положение 1), к Земле обращено неосвещенное лунное полушарие, Луна не видна, и ее фаза $\varphi = 0,00$ называется новолунием, как будто бы рождается «новая» Луна. Поэтому лунную фазу иногда характеризуют условным возрастом Луны, т. е. числом суток, протекающих после новолуния, при котором

принимается возраст $d = 0^{\text{д}}, 0$ (так обозначаются сутки или дни).

Новолуние наступает при соединении Луны с Солнцем (положение 1 на рис. 20), но из-за наклона лунного пути к эклиптике на $5^{\circ}09'$ Луна проходит на небе несколько выше или ниже Солнца и в этот день восходит и заходит почти одновременно с ним. После новолуния Луна постепенно отходит к

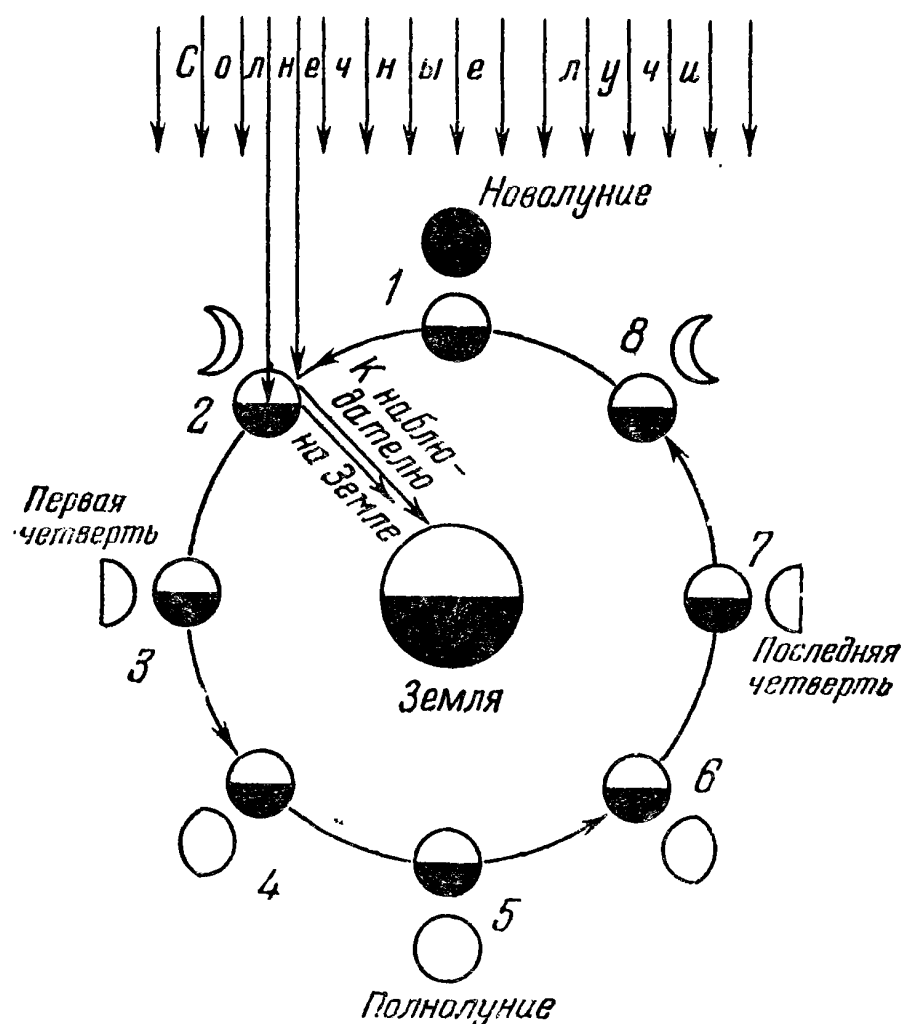


Рис. 20. Смена лунных фаз.

востоку от Солнца (она восходит днем и поэтому ее восход незаметен) и приблизительно через двое суток, при удалении от него примерно на 26° (положение 2 на рис. 20), становится видимой по вечерам в западной половине еще светлого неба в форме узкого серпа (фаза близка к 0,1), выпуклость которого обращена вправо, к горизонту, под которым в это время находится Солнце, освещающее Луну. Краевые точки лунного серпа или его рога всегда расположены на концах одного диаметра лунного диска. Если рога лунного серпа мысленно соединить прямой линией, то получится буква Р — легко запоминающийся символ растущей лунной фазы или молодой Луны. Через

полтора — два часа после захода Солнца серповидная Луна тоже заходит за горизонт.

Линия, отделяющая освещенную часть лунного диска от неосвещенной его части, называется лунным терминатором (от латинского *terminare* — ограничивать) и видна с Земли в форме полуэллипса. На шаровой же поверхности Луны терминатор имеет вид окружности, если, конечно, не считать отклонений от нее из-за неровного рельефа лунной поверхности. При возрастающих фазах Луны на ее терминаторе восходит Солнце и наступает день. Поскольку Луна вращается вокруг своей оси в прямом направлении, то терминатор перемещается по лунной поверхности, как и на Земле, с востока к западу, предшествуя Солнцу, т. е. в направлении от правого края видимого с Земли лунного диска к его левому краю. Поэтому хотя правая половина лунного диска обращена к западной стороне земного горизонта, она называется восточной половиной и входит в восточное полушарие Луны, а левая половина лунного диска называется западной и принадлежит западному полушарию Луны *).

Часто при серповидной фазе виден очень слабо освещенный весь лунный диск. Создается впечатление, что в яркий лунный серп вложено темное полушарие меньшего диаметра. Это явление получило название пепельного света и объясняется тем, что лунный серп освещается непосредственно солнечными лучами, а остальная лунная поверхность — рассеянным солнечным светом, отраженным от Земли. Видимое же различие в диаметрах темного диска и яркого серпа — явление чисто кажущееся, называемое иррадиацией (от латинского *irradiare* — сиять), и объясняется особенностями нашего зрения: яркий предмет воспринимается нами несколько больших размеров, нежели темный.

По мере смещения Луны к востоку от Солнца видимая с Земли освещенная часть лунной поверхности

*) До недавнего времени считалось наоборот, т. е. ориентировали края лунного диска по сторонам земного горизонта, что необходимо иметь в виду при использовании книг прежних изданий.

увеличивается, лунная фаза растет, и через неделю после новолуния, когда Луна отойдет на 90° от Солнца (это положение Луны называется восточной квадратурой), уже видна вся правая половина диска — наступает фаза первой четверти ($\phi = 0,50$, возраст $d = 7^{\text{д}},4$), названная так потому, что в солнечном освещении видима четвертая часть всей шаровой поверхности Луны (см. рис. 20, положение 3). В этой фазе Луна восходит днем, к вечеру видна в южной области неба и заходит ночью.

Через 14—15 суток после новолуния Луна приходит в противостояние с Солнцем (на 180° от него) и ее фаза становится полной ($\phi = 1,00$, $d = 14^{\text{д}},8$), так как солнечные лучи освещают все лунное полушарие, обращенное к Земле (положение 5 на рис. 20). Поскольку полная Луна находится в противоположной Солнцу области неба, то она восходит при заходе Солнца, заходит при его восходе, а в середине ночи видна в южной стороне неба.

После полнолуния Луна постепенно приближается к Солнцу с запада, освещается им слева (с востока) и поэтому ущерб Луны, т. е. уменьшение ее фазы, начинается с правого края, а выпуклость освещенной части обращена к востоку. Теперь уже на лунном терминаторе, видимом с Земли, Солнце заходит, и там наступает ночь.

Примерно через неделю, когда угловое расстояние между Луной и Солнцем сократится до 90° (Луна в западной квадратуре), наступает фаза третьей, или последней, четверти ($\phi = 0,50$, $d = 22^{\text{д}},2$; положение 7 на рис. 20), при которой Луна восходит вблизи полуночи, к восходу Солнца оказывается в южной стороне неба, исчезает на его ярком фоне и заходит днем.

При дальнейшем сближении Луны с Солнцем (положение 8 на рис. 20) ее убывающие фазы становятся серповидными с выпуклостью влево (к востоку), напоминая букву С (стареющая фаза, старая Луна); она восходит и видна в восточной области неба незадолго до восхода Солнца, четко выделяется на светлеющем фоне утренней зари, но постепенно блекнет и при восходе Солнца сливается с ярким голубым небом. В этой фазе Луна заходит в светлое

время суток, перед заходом Солнца, и через несколько дней снова вступает с ним в соединение — наступает очередное новолуние.

Все лунные фазы легко воспроизвести на опыте, для чего достаточно в затемненном помещении зажечь настольную лампу и, отойдя от нее на расстояние 3—4 метров, обводить вокруг себя против часовой стрелки шаровидный предмет. Освещаемый лучами лампы, он покажет последовательную смену лунных фаз.

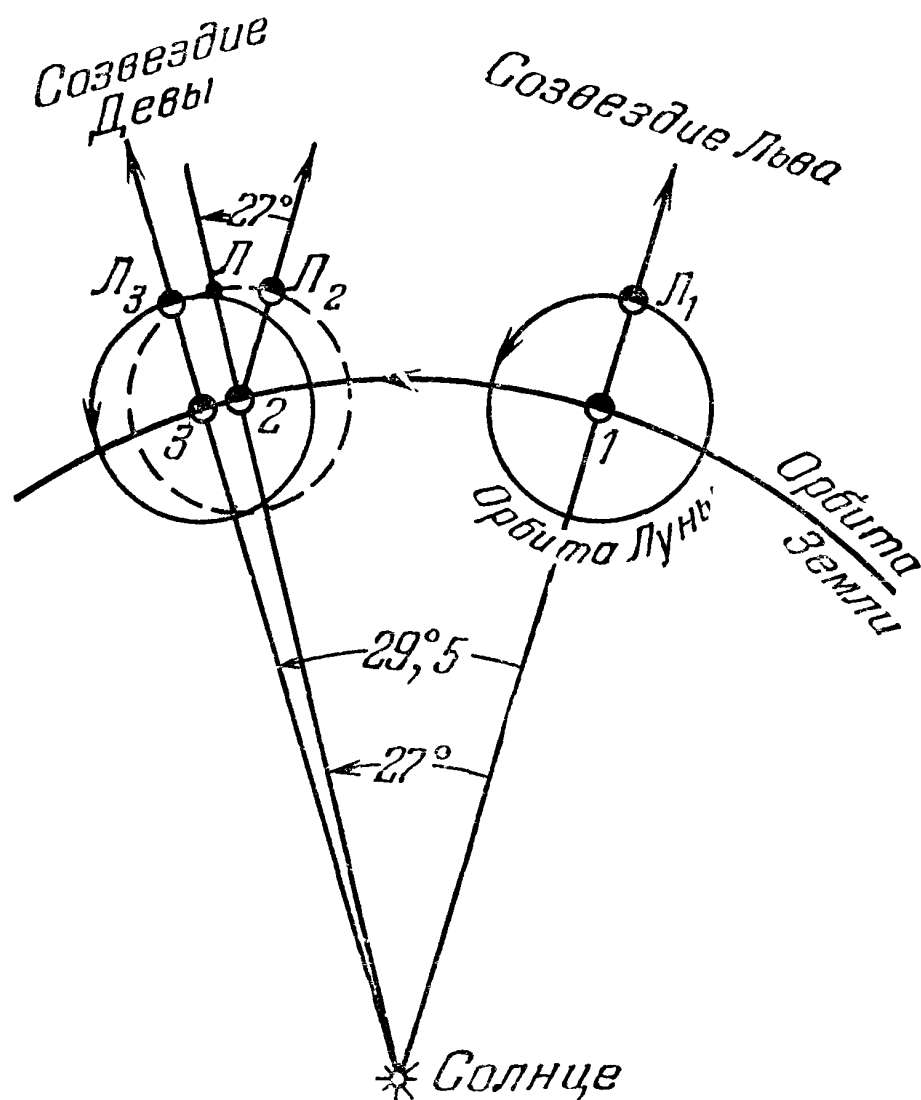


Рис. 21. Продолжительность синодического месяца.

Период смены лунных фаз, называемый синодическим (от греческого «синодос» — соединение) или лунным месяцем, продолжительнее сидерического месяца. Представим себе (рис. 21), что в некоторый момент времени произошло противостояние Луны ($Л_1$) с Солнцем, и Луна в полной фазе видна с Земли (положение 1), скажем, в зодиакальном созвездии Льва. Так как Земля за сутки проходит по своей орбите дугу $\omega_0 = 0^\circ,99 \approx 1^\circ$, то за сидерический месяц $T = 27^д,32$ она пройдет путь $l_0 = 0^\circ,99 \cdot 27,32 \approx 27^\circ$ и окажется в положении 2, а Луна за этот же период времени,

совершив в том же направлении один оборот (360°) вокруг Земли, вернется в прежнюю точку своей орбиты (L_2) и снова будет видна в созвездии Льва, но уже в меньшей фазе, так как ее противостояние Солнцу еще не наступило. Чтобы вновь настало полнолуние, Луне нужно достичь положения L , т.е. пройти дугу $L_2L \approx 27^\circ$. Поскольку за одни сутки Луна смещается по своей орбите в среднем на $\omega = 13^\circ,2$, а Земля, в том же направлении, — на $\omega_0 \approx 1^\circ$, то дугу $L_2L = 27^\circ$ Луна пройдет за промежуток времени

$$\Delta t = \frac{L_2L}{\omega - \omega_0} = \frac{27^\circ}{12^\circ,2} = 2^\text{д},21,$$

за который Земля переместится в положение 3, а Луна — в положение L_3 и опять будет видна в полной фазе, но уже не в созвездии Льва, а в смежном с ним созвездии Девы. Таким образом, промежуток времени между соседними полнолуниями или синодический месяц

$$S = T + \Delta t = 27^\text{д},32 + 2^\text{д},21 = 29^\text{д},53$$

или $S = 29^\text{д}12^\text{ч}44^\text{м}$. Такова средняя продолжительность синодического месяца, истинная длительность которого из-за неравномерного движения Луны и Земли колеблется от $29^\text{д},25$ до $29^\text{д},83$.

Аналогичным образом повторяются все фазы Луны, и следовательно, одинаковые фазы наступают в различных точках лунной орбиты и поочередно во всех зодиакальных созвездиях. Этим и объясняется, почему на протяжении года условия видимости Луны в одной и той же фазе резко различны. Зимой, когда Солнце проходит по южным (летним) зодиакальным созвездиям и его суточный путь над горизонтом низок и короток, полная Луна перемещается по северным (зимним) зодиакальным созвездиям, высоко поднимается и подолгу находится над горизонтом. Летом — картина противоположная: полная Луна повторяет зимний суточный путь Солнца и иногда даже бывает не видна, скрываясь за неровным рельефом местности.

Из-за совпадения периодов вращения и обращения Луны продолжительность ее солнечных суток равна синодическому месяцу, так что на Луне 14,8 земных суток длится день и столько же — ночь.

4. ПРИЧИНЫ И УСЛОВИЯ ВИДИМОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

В своем движении вместе с Землей вокруг Солнца Луна часто заслоняет (покрывает) звезды зодиакальных созвездий, по которым проходит лунный путь. Значительно реже происходят покрытия Луной планет, оказавшихся на небе в непосредственной близости к лунному пути. Периодически Луна частично или полностью заслоняет Солнце — происходят солнечные затмения.

Солнечные затмения возможны только при новолуниях, когда Луна проходит между Солнцем и Землей, но далеко не при всех, поскольку Луна может отходить от эклиптики (на которой находится Солнце) на $5^{\circ}, 2$, а диаметры солнечного и лунного дисков близки к $0^{\circ}, 5$, и следовательно, покрытия Солнца Луной не всегда осуществимы. Условия наступления солнечных затмений мы рассмотрим несколько позже, а сейчас покажем, что солнечные затмения видны отнюдь не из всех местностей дневного полушария Земли, так как из-за своих небольших размеров Луна не может скрыть Солнца от всего земного полушария. Солнце дальше от Земли, чем Луна, примерно в 390 раз, но его диаметр (1 392 000 км) почти в 400 раз превышает диаметр Луны (3474 км), и поэтому освещаемая Солнцем Луна отбрасывает в пространство сходящийся конус тени и окружающий его расходящийся конус полутени. Когда эти конусы пересекаются с земной поверхностью, то лунная тень и полутень падают на нее, и на ней происходит солнечное затмение (рис. 22). Из мест земной поверхности, оказавшихся в лунной тени (*A*, на рис. 22), видно полное солнечное затмение (Солнце полностью закрыто Луной), а в местностях, покрытых лунной полутенью (*B* и *C* на рис. 22), приходит частное солнечное затмение (солнечный диск заслонен Луной не полностью): из-за близости Луны к Земле из южной зоны (*C*) полутени видна закрытой северная (верхняя) часть солнечного диска, а из северной зоны (*B*) — южная (нижняя) его часть. Таким образом, из разных мест земной поверхности Луна вслед-

ствие ее близости к Земле видна в несколько различных направлениях, и такое кажущееся смещение называется параллактическим (от греческого «параллаксис» — уклонение). Его легко продемонстрировать на опыте, для чего достаточно посмотреть на очень близкий предмет (хотя бы на свой палец) попеременно то правым, то левым глазом. У Луны параллактическое смещение может достигать 1° .

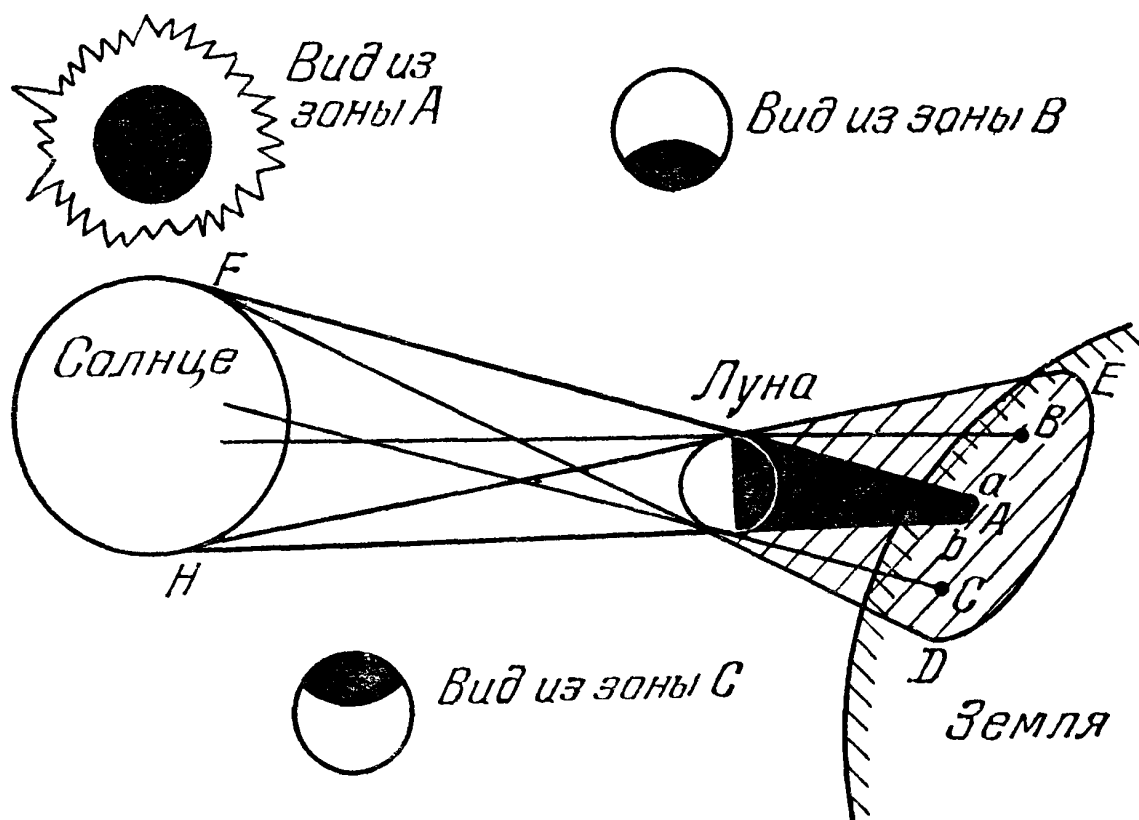


Рис. 22. Схема полного солнечного затмения.

Степень покрытия Солнца Луной называется фазой солнечного затмения и измеряется отношением закрытой части (d) диаметра солнечного диска ко всему его диаметру ($d_\odot$), т.е. фаза солнечного затмения (рис. 23, а)

$$\Phi = \frac{d}{d_\odot}$$

и всегда выражается десятичной дробью. Для любого момента затмения его фаза может быть вычислена по радиусам лунного (r_ζ) и солнечного ($r_\odot$) дисков и угловому расстоянию (σ) между их центрами (рис. 23, б и в). Поскольку $d_\odot = 2r_\odot$, $d = r_\odot - b$ (см. рис. 23, б), а $b = \sigma - r_\zeta$ (см. рис. 23, в) то $d = r_\zeta + r_\odot - \sigma$ и фаза солнечного затмения

$$\Phi = \frac{r_\zeta + r_\odot - \sigma}{2r_\odot}.$$

В зоне лунной полутени, где происходит частное солнечное затмение, $r_{\text{л}} < r_{\odot} + \sigma$ (см. рис. 23, в) и поэтому $r_{\text{л}} + r_{\odot} - \sigma < 2r_{\odot}$, т.е. всегда фаза затмения $\Phi < 1$ и уменьшается в направлении к внешней границе зоны (DE, на рис. 22), на которой происходит внешнее касание дисков, $\sigma = r_{\text{л}} + r_{\odot}$ и фаза $\Phi = 0$, а за этой границей затмения вообще не происходит. Следовательно, солнечные затмения принадлежат к чисто оптическим явлениям.

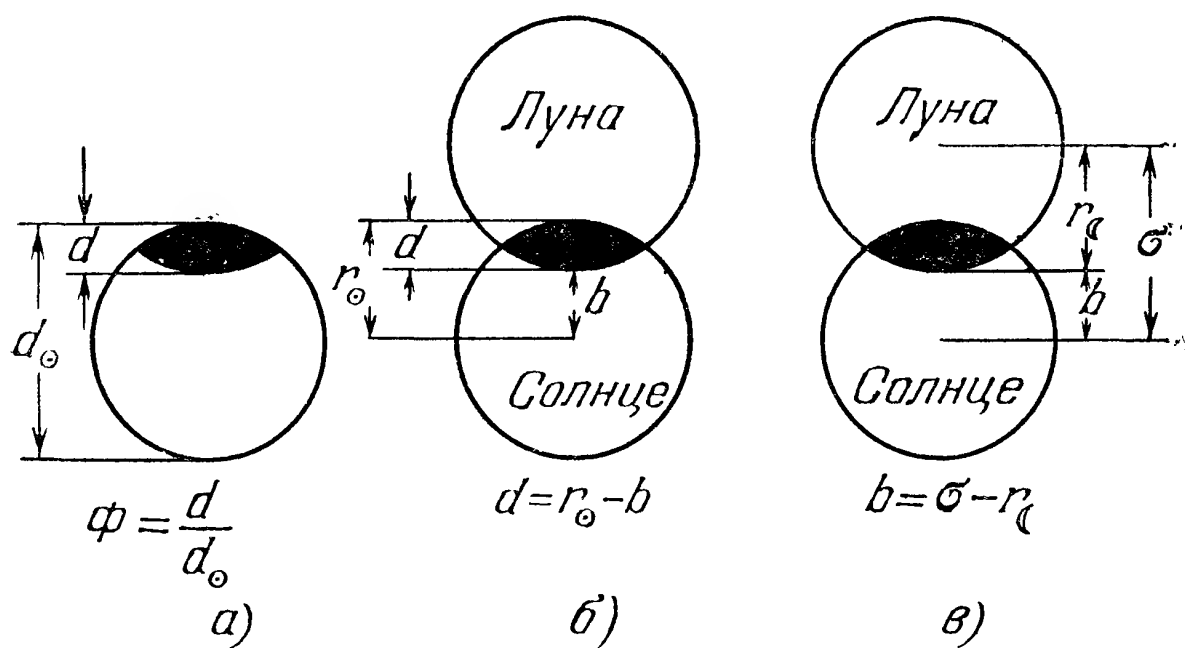


Рис 23. Фаза солнечного затмения.

Лунная тень и полутень на земной поверхности имеют вид овальных пятен, форма которых зависит от положения Солнца и Луны над горизонтом: чем меньше их высота, тем более полого к земной поверхности направлена ось обоих конусов и тем более вытянуты пятна тени и полутени. Если же солнечное затмение происходит вблизи зенита, что возможно только в тропическом поясе Земли, то ось конусов почти перпендикулярна к земной поверхности и форма лунной тени и полутени на ней близка к круговой.

Читатель, наверное, видел, как движется по земной поверхности тень от облаков или как быстро пробегает по ней тень от низко летящего самолета. Подобно этому из-за движения Луны с запада к востоку ее тень и полутень быстро мчатся по земной поверхности примерно в том же направлении,

уклоняясь либо к северу либо к югу *), и совокупность мест, по которым последовательно пробегает лунная тень, образует на Земле своеобразную полосу, называемую полосой полной фазы, посредине которой проходит центральная линия затмения (рис. 24). С центральной линии затмения видно симметричное покрытие солнечного диска лунным, так что в середине затмения центры обоих дисков совпадают, их взаимное расстояние $\sigma = 0$, и, следовательно, наибольшая полная фаза затмения

$$\Phi_m = \frac{r_{\odot} + r_{\oplus}}{2r_{\oplus}} = \frac{1}{2} \left(\frac{r_{\odot}}{r_{\oplus}} + 1 \right),$$

а продолжительность полной фазы зависит от соотношения радиусов дисков. При $r_{\odot} = r_{\oplus}$ даже наибольшая фаза $\Phi_m = 1$ и длится одно мгновение. При самых же благоприятных условиях, когда $r_{\odot} = 16',8$ (Луна в перигее) и $r_{\oplus} = 15',8$ (Земля в афелии), что возможно только в самом конце июня и в начале июля, $\frac{r_{\odot}}{r_{\oplus}} = 1,06$, наибольшая фаза полного затмения $\Phi_m = 1,03$, а само полное затмение длится не более 7,5 минуты.

На границах полосы полной фазы хорошо заметно параллактическое смещение Луны и поэтому покрытие ею Солнца происходит асимметрично, с внутренним касанием их дисков, при котором $\sigma = r_{\odot} - r_{\oplus}$, полное затмение длится одно мгновение, а его наибольшая фаза

$$\Phi_m = \frac{r_{\odot} + r_{\oplus} - \sigma}{2r_{\oplus}} = \frac{r_{\odot} + r_{\oplus} - (r_{\odot} - r_{\oplus})}{2r_{\oplus}} = 1.$$

Ширина полосы полной фазы, равная поперечнику лунной тени, зависит от взаимных расстояний Луны, Земли и Солнца во время затмения. Из-за периодического изменения этих расстояний конус лунной тени может иметь длину от 367 000 до 379 700 км, и поэтому даже при наименьшем геоцентрическом расстоянии Луны в 356 410 км (Луна в перигее) и

*) Вспомним, что лунный путь наклонен к экватору на угол, достигающий почти до 29° (см. стр. 51).

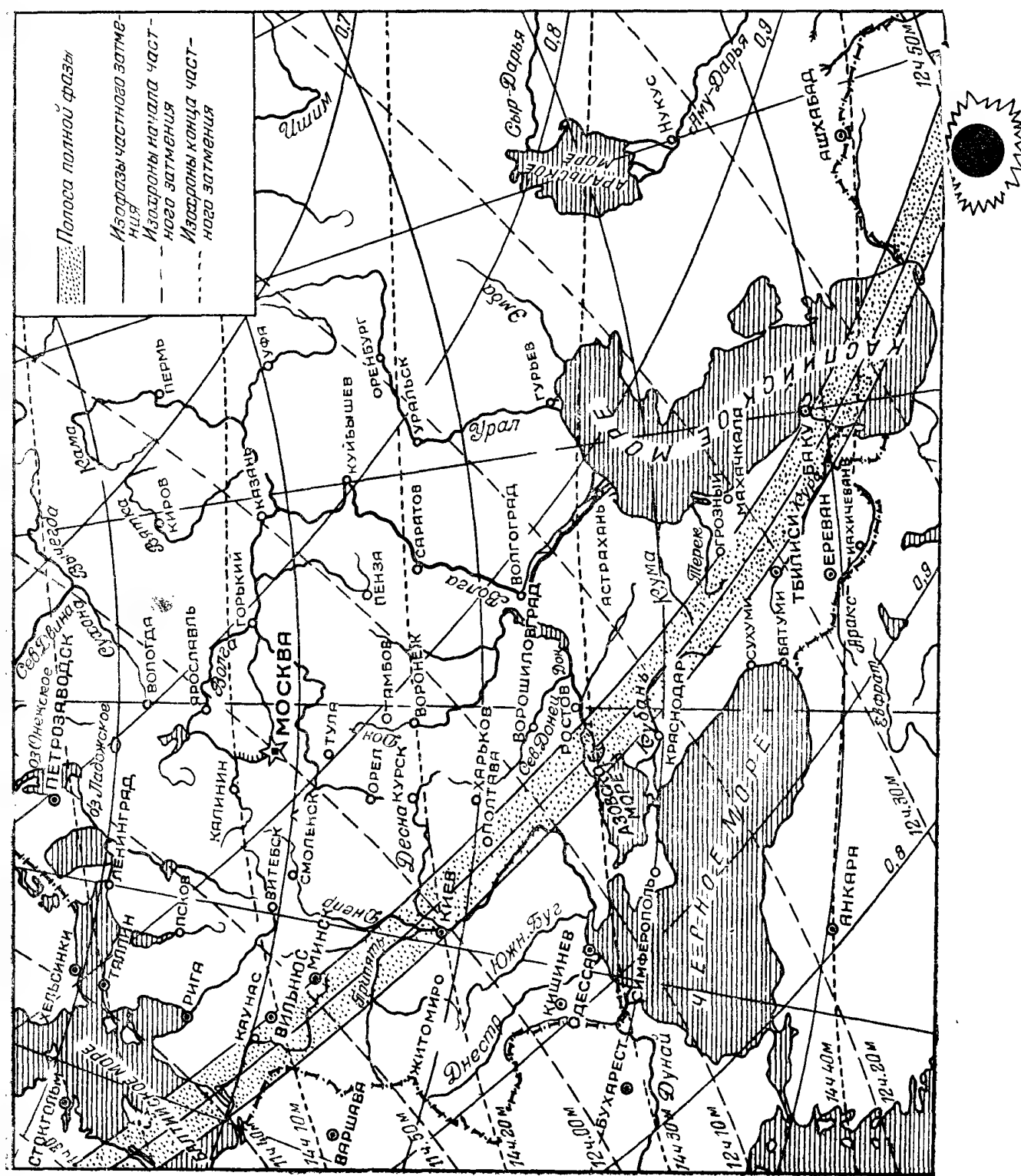


Рис. 24. Карта солнечного затмения 30 июня 1954 г.

наибольшем диаметре ее диска ($33',5$) поперечник лунной тени на земной поверхности не превышает 270 км . При этих же условиях диаметр лунной полутени близок к 6750 км и, следовательно, частное солнечное затмение видно к югу и к северу от полосы полной фазы до расстояния около 3240 км [$(6750\text{ км} - 270\text{ км}) : 2 = 3240\text{ км}$].

Но уже при средних расстояниях Луны от Земли ($384\,400\text{ км}$) и Земли от Солнца лунный диск (диаметр $31',1$) меньше солнечного ($32',0$), а конус лунной тени имеет длину около $373\,300\text{ км}$ и не доходит до земной поверхности примерно на 4700 км (рис. 25).

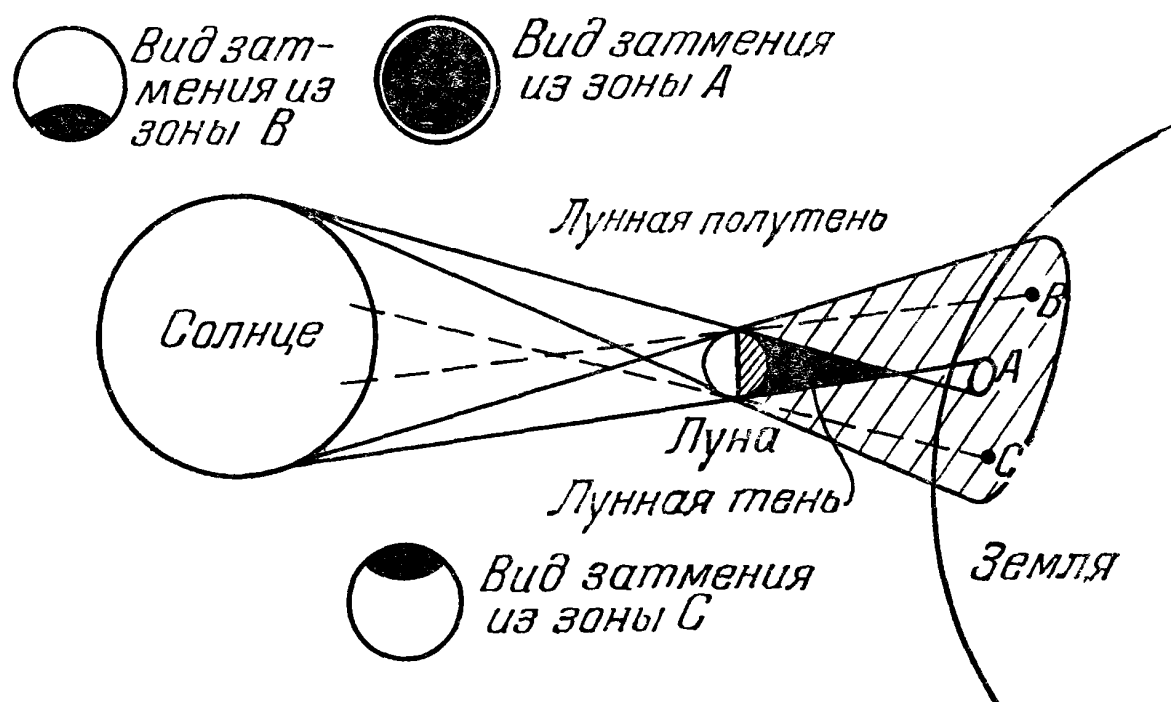


Рис. 25. Схема кольцеобразного солнечного затмения.

Поэтому Луна не закрывает Солнца полностью, и вместо полного происходит кольцеобразное затмение, в середине которого вокруг темного лунного диска видно узкое яркое кольцо незакрытой солнечной поверхности. Наибольшая фаза кольцеобразного затмения тоже определяется по-прежнему, и так как $r_{\text{л}} < r_{\text{с}}$, то $\Phi_m < 1$, но даже при наименьшем $r_{\text{л}} = 14',7$ (Луна в апогее) и наибольшем $r_{\text{с}} = 16',3$ (Земля в перигелии), что возможно только в самом конце декабря и начале января, кольцеобразная фаза затмения, не может быть меньше

$$\Phi_m = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{14',7}{16',3} + 1 \right) = 0,95.$$

Полоса на земной поверхности, из которой видно кольцеобразное затмение, называется полосой кольцеобразной фазы, по обе стороны которой происходит частное затмение. Тут же отметим, что полоса кольцеобразной фазы и полоса полной фазы часто именуются полосой главной фазы, а оба эти вида затмения — центральными.

При наибольшем удалении Луны от Земли до 406 740 км (Луна в апогее) вершина конуса лунной тени не доходит до земной поверхности на 33 360 км. ширина полосы кольцеобразной фазы возрастает до 380 км, а диаметр лунной полутени увеличивается до 7340 км, что все же далеко недостаточно для покрытия всего полушария Земли.

Таким образом, полные солнечные затмения могут происходить лишь при геоцентрических расстояниях Луны меньше среднего расстояния, когда лунный диск равен или больше солнечного, а конус лунной тени направлен к Земле, причем ширина полосы полной фазы при разных затмениях может меняться от 0 до 270 км, а чаще всего бывает от 40 до 100 км.

Когда на Землю вместе с лунной тенью вступает вся лунная полутень, то по земной поверхности проходят обе границы солнечного затмения, северная и южная, определяемые поперечником полутени. Когда же лунная тень падает на Землю, а полутень частично оказывается вне Земли, то затмение имеет только одну границу, либо северную (затмение в южном полушарии Земли), либо южную (затмение в северном полушарии Земли). Но нередко бывает и так, что лунная тень минует Землю, а полутень частично захватывает ее и тогда происходят только частные солнечные затмения, видимые лишь в средней и полярной зоне либо северного, либо южного земного полушария.

Причину и виды солнечных затмений можно показать на простом опыте, демонстрируемом в затемненном помещении. Поставьте на одном конце длинного стола электрическую лампу (лучше в шаровом матовом абажуре), на другом конце — географический глобус, а между ними подвесьте на нитке небольшой шарик. Освещаемый лампой, шарик будет отбрасывать тень и полутень на глобус, т. е. демонстрировать

полное и частное солнечное затмение. Сместив шарик несколько вверх и вниз, можно пропустить его тень мимо глобуса, оставив на нем только полутень, что покажет причину частных солнечных затмений. Смещение шарика далее в том же направлении до схода его полутени с глобуса, продемонстрирует новолуние без солнечных затмений.

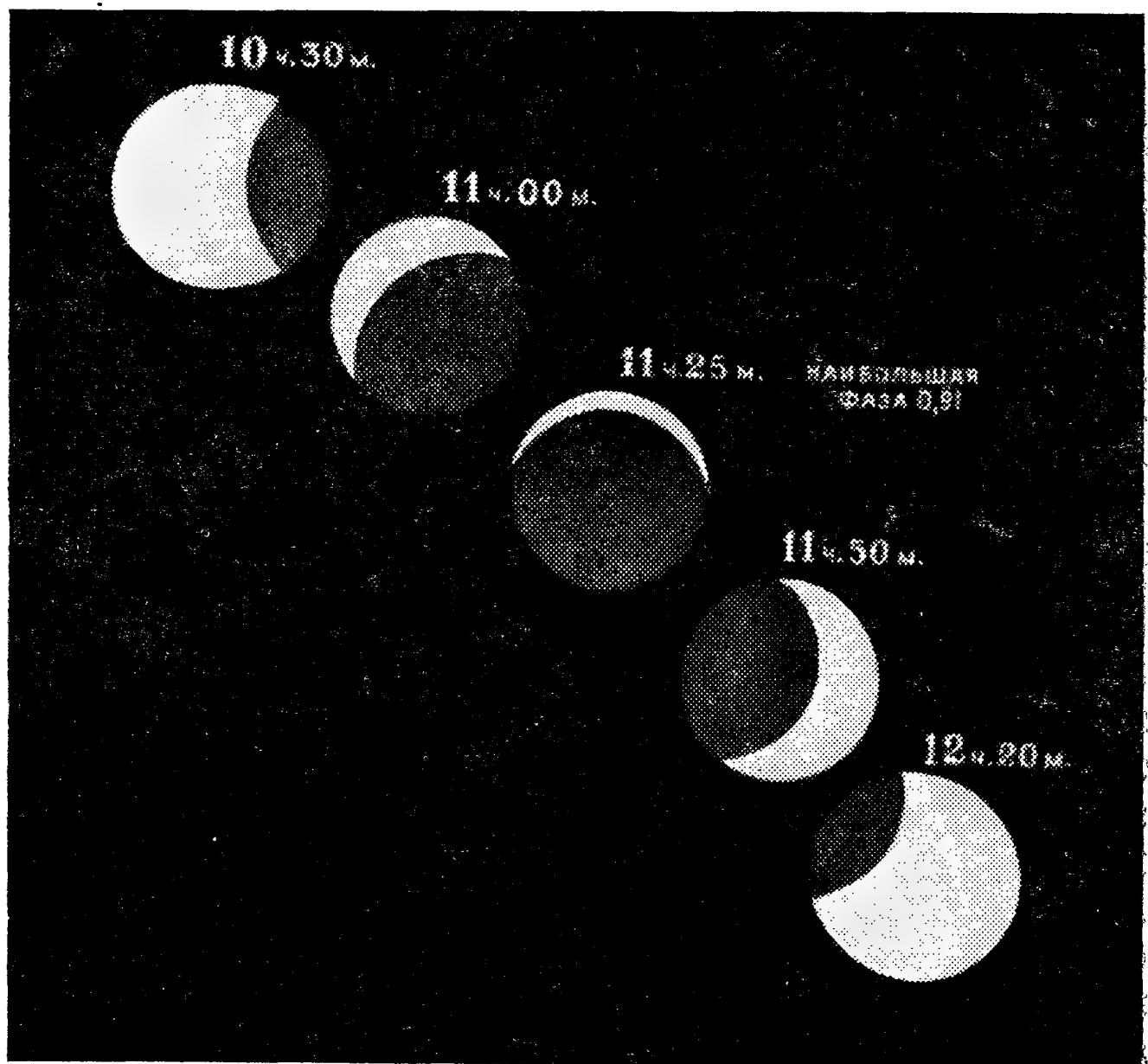


Рис. 26. Ход частного солнечного затмения.

Солнечное затмение начинается с правого, западного края Солнца, на диске которого появляется небольшой ущерб, имеющий форму окружности того же радиуса. Постепенно фаза затмения увеличивается, и солнечный диск принимает вид непрерывно суживающегося серпа, значительно отличающегося по своей форме от серповидных лунных фаз, ограниченных не круговым, а эллиптическим терминатором. Если затмение частное (рис. 26), то в середине за-

тмения его фаза достигает некоторого наибольшего значения, а затем снова уменьшается, и затмение оканчивается на левом, восточном краю солнечного диска. При частных затмениях ослабления солнечного света не заметно (за исключением затмений с наибольшей фазой, близкой к 1), и фазы затмения видны лишь при наблюдениях сквозь темный светофильтр. В полосе полной фазы солнечное затмение

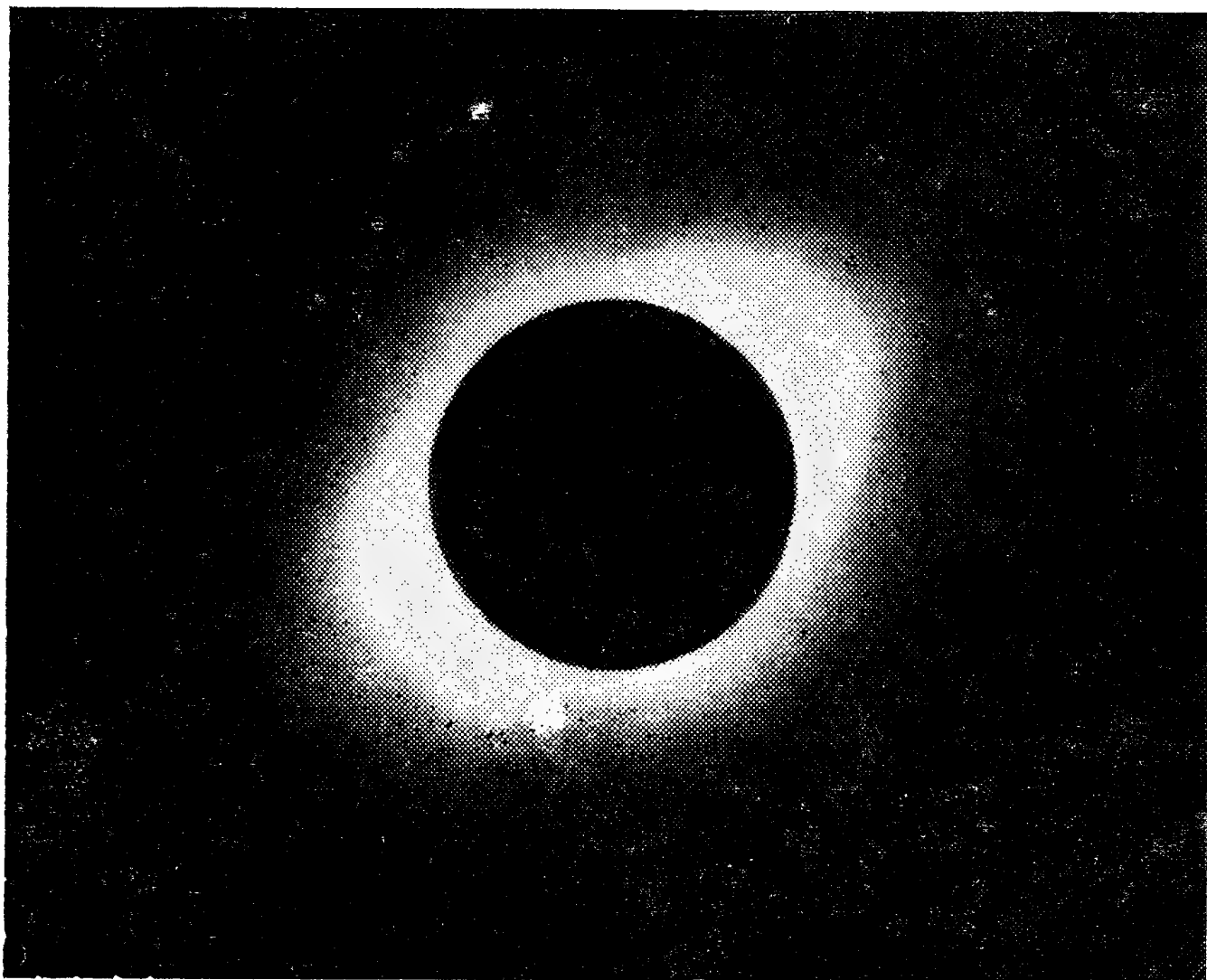


Рис. 27. Фотография солнечной короны.

тоже начинается с частных фаз, но когда Луна полностью закроет Солнце, наступает полумрак, как в темные сумерки, и на потемневшем небе появляются самые яркие звезды и планеты, а вокруг Солнца видно красивое лучистое сияние жемчужного цвета — солнечная корона, представляющая собой внешние слои солнечной атмосферы, не видимые вне затмения из-за их небольшой яркости в сравнении с яркостью дневного неба (рис. 27). Над всем горизонтом вспыхивает розовое заревое кольцо — это в местность, покрытую лунной тенью, проникает солнечный свет из

соседних зон, где полного затмения не происходит, а наблюдается только частное. Ведь синие и голубые лучи, входящие в солнечный свет, обильно рассеиваются земной атмосферой, а красные и оранжевые проходят сквозь нее почти беспрепятственно, и даже плотный приземной слой воздуха не служит им помехой. Поэтому-то этот слой воздуха и воспринимается окрашенным в красновато-розовый цвет.

Вскоре, чаще всего через 2—3 минуты, Луна открывает западный солнечный край, полная фаза затмения оканчивается, пропадает заревое кольцо, быстро светлеет, исчезают звезды, планеты и солнечная корона. Между прочим, вид солнечной короны меняется из года в год, от растрепанного во все стороны, до вытянутого вдоль солнечного экватора. Очевидно вытянутый вид короны дал повод древним египтянам изображать Солнце крылатым.

Касания дисков Луны и Солнца называются контактами и они нумеруются в следующей последовательности: 1 контакт — внешнее касание в момент начала частных фаз затмения; 2 контакт — внутреннее касание в момент начала полной фазы затмения; 3 контакт — внутреннее касание в момент окончания полной фазы затмения; 4 контакт — внешнее касание в момент окончания частных фаз затмения.

В каждой местности затмение начинается и оканчивается в различные моменты времени и его обстоятельства, в том числе и продолжительность, зависят не только от скорости движения лунной тени (полутени), но и от расположения в ней этой местности. Вычисленные обстоятельства затмения наносятся на географическую карту, которая в этом случае называется картой солнечного затмения (см. рис. 24). На ней изображаются линии, соединяющие точки земной поверхности с теми или иными одинаковыми величинами и поэтому называемые изолиниями (от греческого «изос» — равный, одинаковый). Так, изохроны начала (конца) частного затмения проходят через точки, в которых частное затмение начинается (оканчивается) в один и тот же момент в определенной системе счета времени, например, по московскому времени. Изофазы всегда соединяют точки, в которых наибольшая фаза затмения одинакова (пра-

вильнее их называть изофазами наибольшей фазы). Полоса полной фазы ограничена изофазами с фазой $\Phi = 1,00$, а границы солнечного затмения, определяемые краями лунной полутени, лежат на изофазах $\Phi = 0,00$. При кольцеобразном затмении полоса кольцеобразной фазы ограничена изофазами, показывающими наибольшую фазу затмения. По такой карте нетрудно узнать приближенные обстоятельства хода солнечного затмения в определенной местности.

Продолжительность всего затмения и его полной фазы на центральной линии подсчитывается по диаметрам лунной полутени и тени и по скорости их перемещения по земной поверхности. Вычисления эти, как и вычисления всех обстоятельств солнечных затмений для разных местностей Земли, очень сложны, поскольку скорость лунной тени (и полутени) на земной поверхности зависит от величины и направления геоцентрической скорости Луны, от географической широты местности и от угла наклона конуса лунной тени к поверхности этой местности. Но все же, ради наглядности, можно показать хотя бы приближенный принцип вычисления продолжительности полного солнечного затмения на центральной линии полосы полной фазы.

Коль скоро движение Луны и вращение Земли происходит в прямом направлении, то лунная тень перемещается по земной поверхности примерно со скоростью

$$v_T = v - v_0,$$

где v — геоцентрическая скорость Луны и v_0 — линейная скорость точек земной поверхности в направлении движения лунной тени.

Очевидно, что наибольшая продолжительность полной фазы затмения возможна только при максимальном диаметре лунной тени $D_T = 270$ км и лишь в экваториальной зоне Земли, где линейная скорость точек земной поверхности наибольшая и близка к $v_0 = 0,47$ км/сек. Максимальный же диаметр лунной тени, как мы уже знаем, возможен лишь при наименьшем геоцентрическом расстоянии Луны, когда ее скорость приближается к $v = 1,08$ км/сек. Поэтому

наибольшая продолжительность полной фазы солнечного затмения

$$\tau_m = \frac{D_r}{v - v_0} = \frac{270}{1,08 - 0,47} = 443^c = 7^m 23^c,$$

а более точные расчеты приводят к значению $\tau_m = 451^c = 7^m 31^c$.

Но условия для таких продолжительных полных затмений наступают крайне редко. На протяжении полутора тысяч лет, с VII до начала XXIII столетия, не было и не будет ни одного такого затмения. Но с несколько меньшей продолжительностью полные солнечные затмения в XX столетии были 8 июня 1937 г., длившееся $7^m 04^c$ (полоса полной фазы проходила по Тихому океану, Южной и Центральной Америке), 20 июня 1955 г., длительностью в $7^m 08^c$ (полоса шла по Индийскому океану, Филиппинским островам и Тихому океану) и 30 июня 1973 г. в Центральной Африке, продолжавшееся в Нигере $7^m 10^c$. Полное же солнечное затмение почти наибольшей возможной продолжительности, длительностью в $7^m 29^c$, произойдет лишь 16 июля 2186 г. в экваториальном поясе Земли.

Аналогично можно подсчитать, что в исключительных случаях наибольшая продолжительность кольцеобразной фазы солнечного затмения достигает $12^m,3$, а частного затмения — до 3,5 часа. Но подавляющее большинство затмений длится до двух с половиной часов, а их полная или кольцеобразная фаза всего лишь 2—3 минуты. Общая же длительность полного затмения на Земле, с момента вступления лунной тени на нашу планету до момента схода тени с нее, обычно составляет от одного до трех с половиной часов, и за этот промежуток времени лунная тень пробегает по Земле путь от 6000 до 12000 км. Солнечное затмение начинается в западных районах земной поверхности при восходе Солнца и заканчивается на востоке при его заходе. Общая продолжительность всех фаз солнечного затмения на Земле может достигать шести часов.

Теперь рассмотрим условия наступления солнечных затмений. Представим себе эклиптику, пересекающийся с нею в лунных узлах (Ω и Υ) под углом

$i = 5^\circ, 2$ лунный путь и положения Солнца и Луны в различные новолуния (рис. 28). При новолуниях, происходящих вдали от лунных узлов (новолуния 1, 7, 8, 13), солнечные затмения невозможны — Луна проходит на небе ниже (южнее) или выше (севернее)

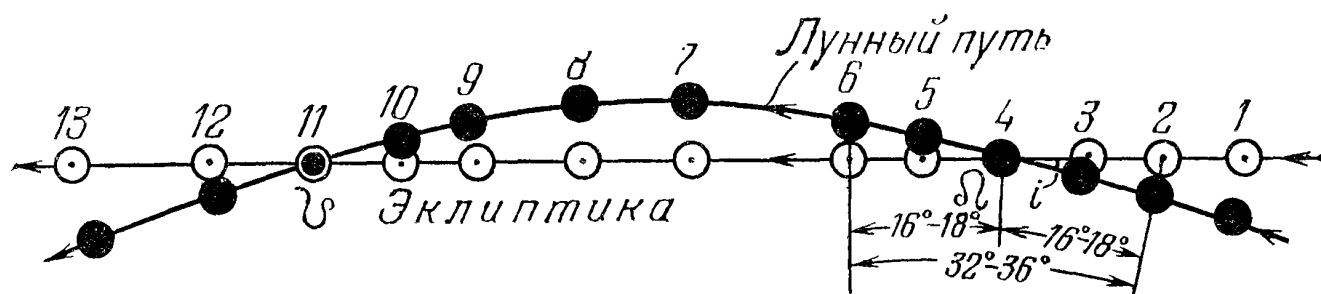


Рис. 28. Условия наступления солнечных затмений (ради наглядности наклонение i лунного пути преувеличено). Солнце ($\odot$) и Луна ($\bullet$) при различных новолуниях.

Солнца. И только при новолуниях вблизи лунных узлов наступают частные (новолуния 3, 5, 10) и полные или кольцеобразные (новолуния 4, 11) солнечные затмения. Чтобы произошло частное затмение, необходимо внешнее касание солнечного и лунного

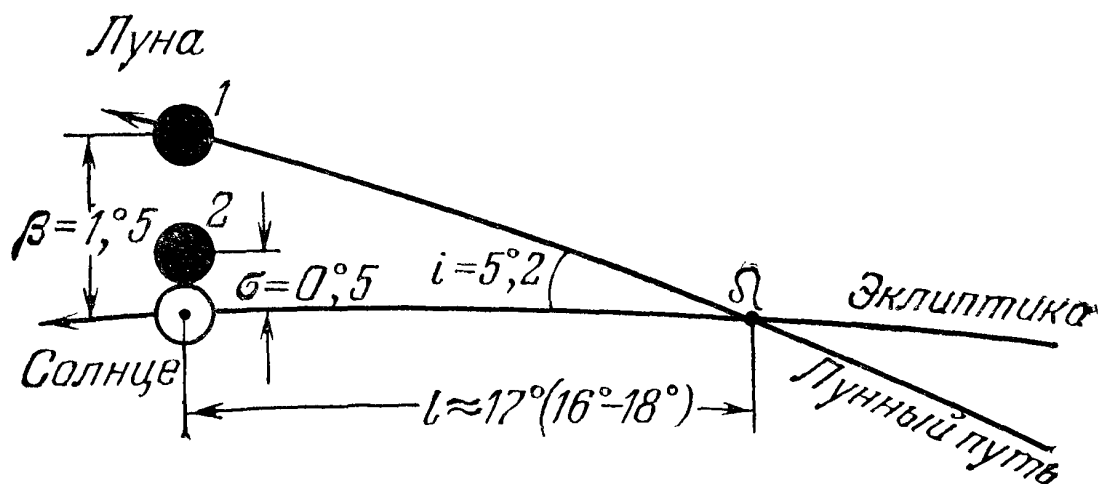


Рис. 29. Истинное (1) и видимое (2) положение Луны.

дисков (новолуния 2, 6, 12), диаметры которых прием приближенно за $0^\circ, 5$, и тогда видимое угловое расстояние между центрами дисков $\sigma = 0^\circ, 5$ (рис. 29). Но вспомним, что параллактическое смещение Луны может достигать $p = 1^\circ$, и поэтому из ряда мест земной поверхности касание дисков будет видно даже при истинном расстоянии $\beta = 0^\circ, 5 + 1^\circ = 1^\circ, 5$. Математика располагает формулой, позволяющей

вычислить угловое расстояние l Солнца от лунного узла:

$$\begin{aligned}\sin l &= \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{ctg} i = \\ &= \operatorname{tg} 1^{\circ},5 \cdot \operatorname{ctg} 5^{\circ},2 = 0,0262 \cdot 11,095 = 0,2906\end{aligned}$$

откуда $l = 16^{\circ},9 \approx 17^{\circ}$.

Такие же подсчеты для наибольших и наименьших диаметров дисков обоих светил дают соответственно $l = 18^{\circ}$ и $l = 16^{\circ}$. Следовательно, частные солнечные затмения могут произойти при новолуниях, наступающих не далее 18° от лунных узлов, а при расстояниях менее 16° они происходят обязательно.

При полных и кольцеобразных солнечных затмениях истинное расстояние между центрами дисков светил определяется только параллаксом Луны $\beta = \rho = 1^{\circ}$ и поэтому при наименьших диаметрах дисков $l = 10^{\circ}$, а при наибольших — $l = 11^{\circ},5$. Значит, центральные затмения происходят в периоды новолуний, наступающих не далее $11^{\circ},5$ от лунных узлов, и чем ближе к узлу происходит затмение, тем больше его продолжительность. Наиболее продолжительные центральные затмения происходят в самих узлах, и полоса их главной фазы пролегает в тропическом поясе Земли.

Бытует мнение, что солнечные затмения происходят очень редко, но в действительности это далеко не так. В самом деле, дуга эклиптики, в пределах которой происходят солнечные затмения и поэтому называемая зоной солнечных затмений (см. рис. 28), имеет протяженность в $32^{\circ} — 36^{\circ}$ (по $16^{\circ} — 18^{\circ}$ в обе стороны от лунного узла), и Солнце, ежедневно смещаясь по эллиптике на $\omega_{\odot} \approx 1^{\circ}$, должно пройти эту зону за 32—36 суток. Но лунные узлы сами смещаются навстречу Солнцу за сутки на $0^{\circ},053$, а за 32—36 суток — почти на 2° , и поэтому Солнце проходит зону затмений за 30—34 дня, на протяжении которых обязательно наступает хотя бы одно новолуние, а иногда и два (вблизи краев зоны), так как они чередуются через синодический месяц $S = 29,53$ суток. Следовательно, в зоне затмений у каждого лунного узла обязательно происходит одно солнечное затмение разного вида, а иногда, значительно ре-

же, — по два частных затмения с небольшой фазой. Но двух подряд центральных солнечных затмений вблизи одного лунного узла (т. е. на протяжении 34 суток) быть никак не может, потому что такие затмения наступают не далее $11^{\circ},5$ в обе стороны от лунного узла, а эту зону в $23^{\circ}(2 \cdot 11^{\circ},5)$ Солнце проходит за 22 дня, в интервале которых возможно только одно новолуние.

Ежегодно наступают две эпохи затмений, разделенные примерно полугодом. В самом деле, ведь зоны солнечных затмений — диаметрально противоположны, и Солнце, выйдя из одного лунного узла, должно было бы подойти к другому ровно через полгода (183 дня), но из-за отступления лунных узлов сами зоны затмений смещаются за полгода навстречу Солнцу почти на 10° , и поэтому промежуток времени между затмениями в противоположных зонах сокращается примерно на 5 дней и составляет 177—178 суток. Почему же сокращение этого промежутка времени происходит только на 5, а не на 10 суток, за которые Солнце прошло бы по эклиптике дугу в 10° ? Проведем простой и весьма приближенный подсчет.

Вспомним, что за одни сутки Луна перемещается по своему пути к востоку в среднем на $\omega = 13^{\circ},2$ и один оборот (360°) вокруг Земли совершает за звездный месяц (27,32 суток), за который лунные узлы смещаются навстречу Луне примерно на $1^{\circ},5$. Следовательно, Луна, выйдя из одного своего узла, снова к нему возвращается через период времени

$$S_{\Omega} = \frac{360^{\circ} - 1^{\circ},5}{13^{\circ},2} = 27,21 \text{ суток,}$$

называемый драконическим месяцем.

По той же причине отступления лунных узлов на $19^{\circ},3$ за год (365,3 суток) Солнце возвращается к одному и тому же узлу через промежуток времени $T_{\Omega} = 365,3 - 19,3 = 346$ суток, называемый драконическим годом (точнее, $T_{\Omega} = 346,62$ суток). За указанный промежуток времени Луна пройдет путь $13^{\circ},2 \cdot 346,6 = 4570^{\circ}$, т. е. совершит 12 полных оборотов ($360^{\circ} \cdot 12 = 4320^{\circ}$) и еще пройдет дугу $L = 4570^{\circ} - 4320^{\circ} = 250^{\circ}$, не дойдя до соединения с Солнцем (до новолуния) на $360^{\circ} - 250^{\circ} = 110^{\circ}$. Но так как

само Солнце за сутки смещается к востоку на $\omega_{\odot} = 1^{\circ}$, то, чтобы догнать и затмить его, Луне требуется еще около 9—10 суток $[110^{\circ} : (\omega - \omega_{\odot}) = 110^{\circ} : (13^{\circ},2 - 1^{\circ}) \approx 9 - 10 \text{ суток}]$ и следовательно, очередное солнечное затмение вблизи того же узла произойдет через $346 + 9$ (или $+ 10$) = 355 (или 356) суток, а после него, уже вблизи противоположного лунного узла, на половину меньше, т. е. через 177—178 суток.

Таким образом, если одна пара частных солнечных затмений произошла в самом начале января и февраля, то следующая пара может соответственно наступить через 178 суток, т. е. в конце июня и июля, но из очередной пары частных затмений только одно произойдет в двадцатых числах декабря, а другое уже придется на январь следующего календарного года. Значит, ежегодно происходит обязательно два солнечных затмения любого вида, а в очень редкие годы—до пяти частных затмений с малыми фазами. Такой редкий случай произошел в 1935 г. и до 2206 г. больше не повторится. Но четыре частных солнечных затмения будут в 1982, 2000, 2011, 2019, 2047 гг. Чаще всего ежегодно бывает по 2—3 солнечных затмения, причем одно из них, как правило, полное или кольцеобразное. Однако иногда, правда, крайне редко, на протяжении одного календарного года происходят три центральных (полных и кольцеобразных) солнечных затмения, и ближайшее такое сочетание наступит в 2042—2046 г., когда на протяжении пяти лет произойдет 12 центральных солнечных затмений и ни одного частного.

В разные годы лунная тень пробегает по различным местам земной поверхности, и поэтому в каждой местности полные солнечные затмения происходят очень редко, в среднем один раз за 300—400 лет, хотя бывают и исключения. Так, например, в Москве полные солнечные затмения были видны 11 августа 1123 г. *), 20 марта 1140 г. (т. е. через 16 лет), 7 июня 1415 г. (через 275 лет), 25 февраля 1476 г. (через 61 год) и в ее окрестностях—19 августа 1887 г. (через 411 лет). Очередное полное затмение Солнца

*) Даты даются по современному календарю.

в Москве, продолжительностью около 7 минут, произойдет 16 октября 2126 г. В Жданове же и Ейске полные солнечные затмения наблюдались 30 июня 1954 г. и 15 февраля 1961 г., т. е. менее чем через 7 лет.

Частные солнечные затмения происходят в каждой местности, естественно, чаще полных затмений, так как диаметр лунной полутени, как было уже показано, значительно превышает поперечник лунной тени. Так, например, на долю Москвы за 30 лет, с 1952 по 1981 г. включительно, приходится 13 частных солнечных затмений, т. е. в Москве они происходят в среднем через каждые 2,3 года. Аналогичная картина присуща и многим другим местам земной поверхности. Но коль скоро при частных солнечных затмениях с небольшой фазой солнечный свет почти не слабеет, то на них просто не обращают внимания и относят затмения Солнца к числу очень редких явлений природы.

Астрономы тоже не уделяют внимания частным солнечным затмениям с малой фазой покрытия Солнца Луной. Но частные затмения со значительной фазой уже вызывают их интерес, так как изучение серии фотографий последовательных фаз затмения позволяет уточнить движение Луны и при необходимости внести в теорию ее движения соответствующие поправки. Полные же солнечные затмения астрономы наблюдают обязательно, и для этого им зачастую приходится отправляться в очень далекие экспедиции и заранее, за 3—4 недели до затмения, устанавливать и налаживать научную аппаратуру. Помимо уточнений для теории движения Луны, сопоставление вычисленных и наблюдаемых контактов и фаз затмения помогает изучать ничтожные отклонения от равномерного вращения Земли, ну, а главная цель наблюдений полных солнечных затмений,— это, конечно, изучение солнечной короны, внешние области и лучи которой вне затмения не видны. За те несколько минут, что длится полная фаза затмения, астрономы успевают на своих инструментах получить многочисленные фотографии короны, снятые в разных цветных лучах, фотографии ее спектра, записать посредством саморегистрирующей аппаратуры

изменение интенсивности ее радиоизлучения и выполнить еще ряд других наблюдений, крайне необходимых для изучения физической природы Солнца и происходящих на нем процессов. Это изучение в свою очередь помогает астрономам познавать природу многочисленных звезд, лишь одной из которых является наше Солнце.

5. ПРИЧИНЫ И УСЛОВИЯ НАСТУПЛЕНИЯ ЛУННЫХ ЗАТМЕНИЙ

В отличие от солнечных, лунные затмения представляют собой не оптическое, а физическое явление прохождения Луны сквозь земную тень, имеющую, как и у Луны, форму сходящегося круглого конуса, окруженного расходящейся полутенью (рис. 30).

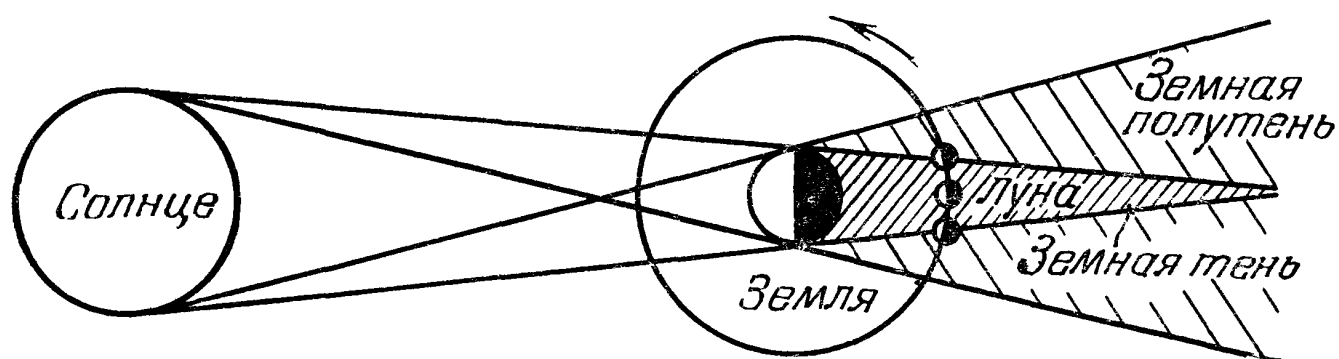


Рис. 30. Схема лунного затмения.

В зависимости от гелиоцентрического расстояния Земли, длина ее тени может быть различной — от 1359 тыс. км (Земля в перигелии) до 1405 тыс. км (Земля в афелии), а при среднем расстоянии близка к 1382 тыс. км, т. е. всегда больше геоцентрического расстояния Луны. Ось земной тени лежит в плоскости земной орбиты и поэтому тень и полутень проектируются на небо в виде концентрических кругов, центр которых находится на эклиптике, в точке, диаметрально противоположной Солнцу. Следовательно, чтобы произошло лунное затмение, Луна должна противостоять Солнцу, т. е. быть в фазе полнолуния. Но на среднем расстоянии Луны от Земли (384 400 км) угловой радиус земной тени $r = 42' = 0^{\circ},7$, на наименьшем расстоянии $r = 47' = 0^{\circ},8$, а

при наибольшем — $r = 38' = 0^{\circ},6$. Луна же отходит от эклиптики на угловое расстояние до $5^{\circ},2$ и поэтому далеко не при всех полнолуниях, наступающих в различных точках лунного пути, она попадает в земную тень, а проходит либо ниже (южнее), либо выше (севернее) нее (рис. 31, полнолуния 1, 6, 7). Если же полнолуния наступают вблизи лунных узлов, то Луна частично (полнолуния 4, 10) или полностью (полнолуния 3, 9) погружается в земную тень — происходят частные и полные теневые лунные затмения.

Перед погружением в земную тень Луна проходит сквозь полутень Земли, но ослабление лунного света при этом настолько ничтожно, что невооруженным глазом не обнаруживается, и поэтому полутеневых лунных затмений мы рассматривать не будем. Отметим только, что радиус земной полутени на расстоянии Луны может превышать радиус земной тени

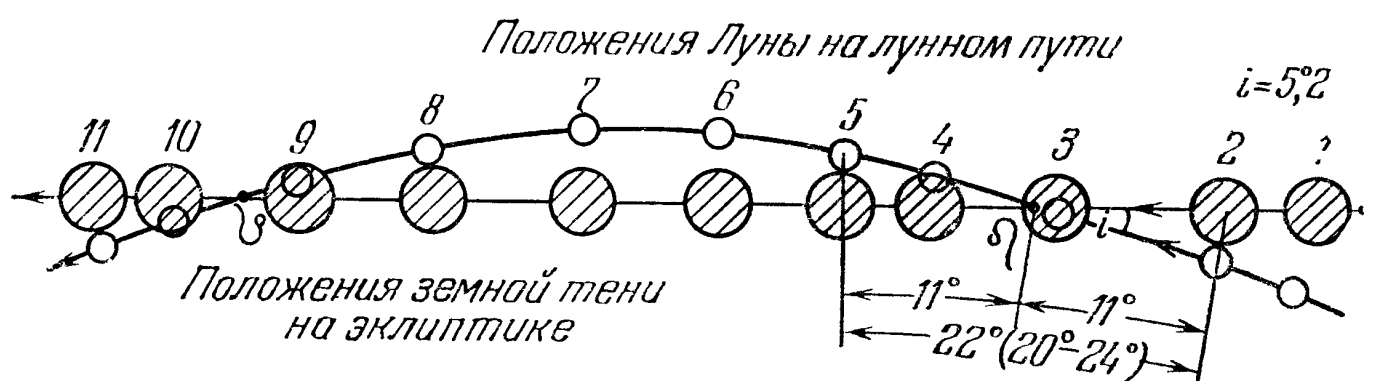


Рис 31. Условия наступления лунных затмений. Луна и земная тень при различных полнолуниях.

в 1,69—1,86 раза. В дальнейшем под частными и полными лунными затмениями мы будем подразумевать только теневые затмения, при которых Луна погружается в земную тень.

Участок эклиптики, на котором происходят лунные затмения, называется зоной лунных затмений и ее границы определяются внешним касанием Луны с земной тенью (полнолуния 2, 5, 8, 11 на рис. 31). Положение этих границ относительно лунного узла вычисляется по формуле

$$\sin l = \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{ctg} i$$

(см. стр. 82), в которой наклонение лунного пути к эклиптике $i = 5^{\circ},2 = 5^{\circ}09'$, а угловое расстояние

между центрами лунного диска и земной тени $\beta = \sigma = r + r_{\odot}$, где r — радиус земной тени и $r_{\odot}$ — радиус лунного диска.

Здесь уже не нужно учитывать параллакса Луны, так как она и падающая на нее область земной тени находятся на одинаковом геоцентрическом расстоянии.

При средних значениях радиуса земной тени $r = 42'$ и радиуса лунного диска $r_{\odot} = 16'$ границы зоны частных затмений отстоят от лунного узла на $l = 11^\circ$, а при крайних значениях — смещаются в ту или иную сторону на 1° . Полные же лунные затмения, наступающие при угловом расстоянии между центрами Луны и земной тени $\sigma = r - r_{\odot}$, могут происходить не далее, чем в $4^\circ,5 - 5^\circ,5$ от лунного узла.

Чем ближе к лунному узлу происходит лунное затмение, тем больше его фаза, определяемая долей (d) лунного диаметра ($d_{\odot}$), покрытой земной тенью, т. е. фаза затмения

$$\Phi = \frac{d}{d_{\odot}},$$

и, аналогично фазе солнечного затмения, вычисляется по формуле

$$\Phi = \frac{r + r_{\odot} - \sigma}{2r_{\odot}},$$

в которой угловое расстояние σ между центрами лунного диска и земной тени меняется в ходе затмения.

Смещаясь с запада к востоку, Луна входит в земную тень своим левым краем и им же выходит из тени. При частном затмении (см. рис. 2) его фаза постепенно возрастает от $\Phi = 0$ в момент внешнего касания Луной земной тени (1 контакт) до некоторого наибольшего значения $\Phi_m < 1$, зависящего от степени погружения Луны в земную тень, а затем уменьшается и в конце затмения (4 контакт) снова становится равной нулю. Коль скоро Земля шарообразна, то край ее тени, покрывающий Луну, имеет форму окружности, радиус которой превышает радиус лунного диска примерно в 2,7 раза (от 2,6 до 2,8). Из-за этого непокрытая земной тенью часть лунного

диска хотя и выглядит серповидной, но вид такого серпа резко отличается от серповидных лунных фаз, поскольку его концевые точки лежат не на диаметре лунного диска, а на одной из его хорд.

Полному лунному затмению предшествуют частные фазы и в момент окончательного погружения Луны в земную тень (2 контакт, $\sigma = r - r_{\zeta}$) наступает полное затмение ($\Phi = 1$) (рис. 32). Казалось

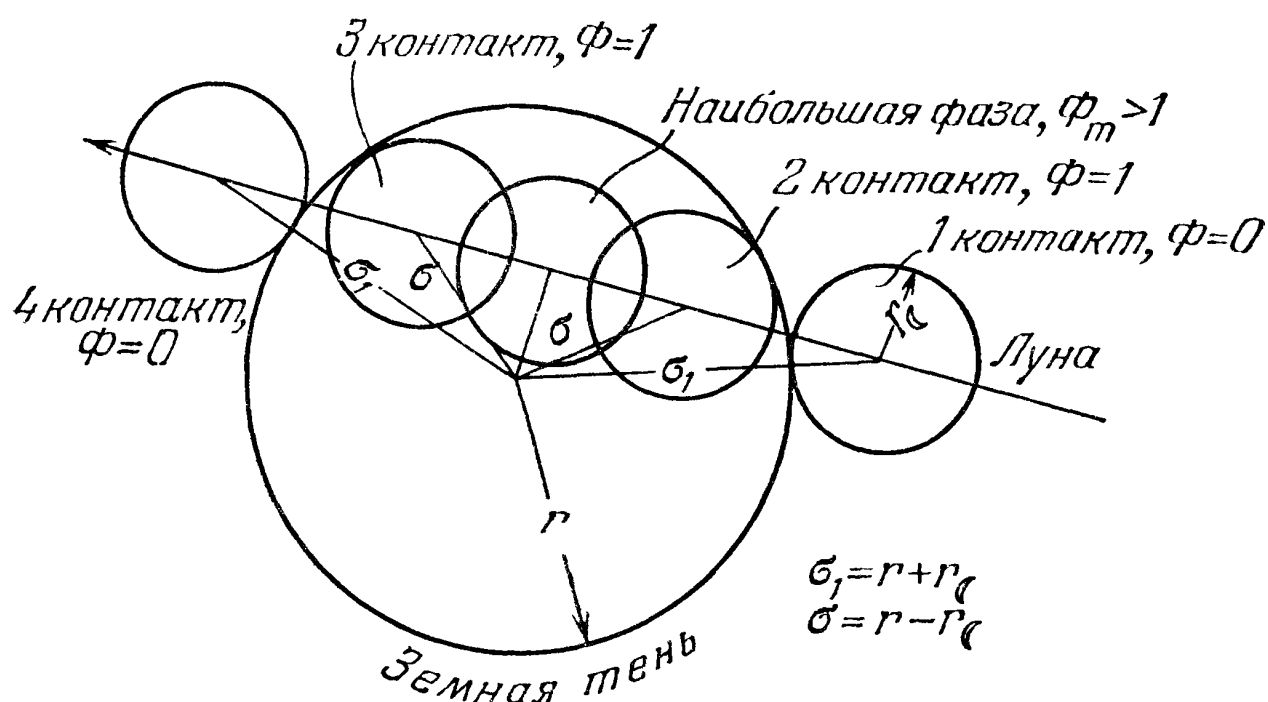


Рис. 32. Контакты и фазы лунного затмения.

бы, что при полном покрытии Луны земной тенью фаза лунного затмения всегда равна 1,00 и не может ее превышать. Однако это не так, поскольку наибольшая фаза должна характеризовать не только степень покрытия Луны земной тенью, но и глубину погружения Луны в тень Земли, потому что от этого зависит продолжительность полной фазы затмения. Именно поэтому полная фаза вычисляется тоже по приведенной выше формуле и в ходе полного затмения увеличивается до наибольшего значения $\Phi_m > 1$ (середина затмения), а затем убывает и к началу выхода Луны из тени (3 контакт, $\sigma = r - r_{\zeta}$) снова становится равной единице. Далее идут частные фазы, постепенно уменьшающиеся до нуля.

Что касается величины наибольшей фазы Φ_m полного лунного затмения, то она зависит главным образом от расположения земной тени относительно

лунного узла. При их взаимном расстоянии, близком к 4° , глубина погружения Луны в земную тень незначительна, и полная фаза затмения немногим более единицы. В редких же случаях, когда центр земной тени совпадает с лунным узлом, Луна проходит сквозь тень по ее диаметру*), в середине затмения $\sigma = 0$ и наибольшая фаза

$$\Phi_m = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_\odot} + 1 \right).$$

Поскольку минимальное значение $\frac{r}{r_\odot} = 2,6$ (Луна — в апогее, Земля — в перигелии), а максимальное значение $\frac{r}{r_\odot} = 2,8$ (Луна — в перигее, Земля — в афелии), то наибольшая фаза центрального лунного затмения может быть от $\Phi_m = 1,80$ до $\Phi_m = 1,90$.

Коль скоро Луна реально погружается в земную тень, то лунные затмения видны со всего ночного полушария Земли, где Луна находится над горизонтом, и начинаются (и оканчиваются) одновременно в какой-либо определенной системе счета времени, например, по московскому времени. Поэтому проводить специальные вычисления обстоятельств лунных затмений для разных местностей земной поверхности нет необходимости, и чтобы получить моменты хода затмения по времени T определенной местности, достаточно к моментам T_m , указанным по московскому времени, прибавить разность $(T - T_m)$ в целых часах между местным и московским временем, т. е. $T = T_m + (T - T_m)$.

Для лунных затмений тоже составляются карты, но они значительно проще карт солнечных затмений, так как на них показываются лишь предельные линии, соединяющие местности земной поверхности, в которых Луна восходит и заходит в моменты начала, середины и окончания затмения (полутеневого, частного и полного), а также географические меридианы, где Луна в те же моменты времени занимает наивысшее положение над горизонтом, т. е. находится в верхней кульминации (рис. 33).

*) Такие редкие затмения называются центральными.

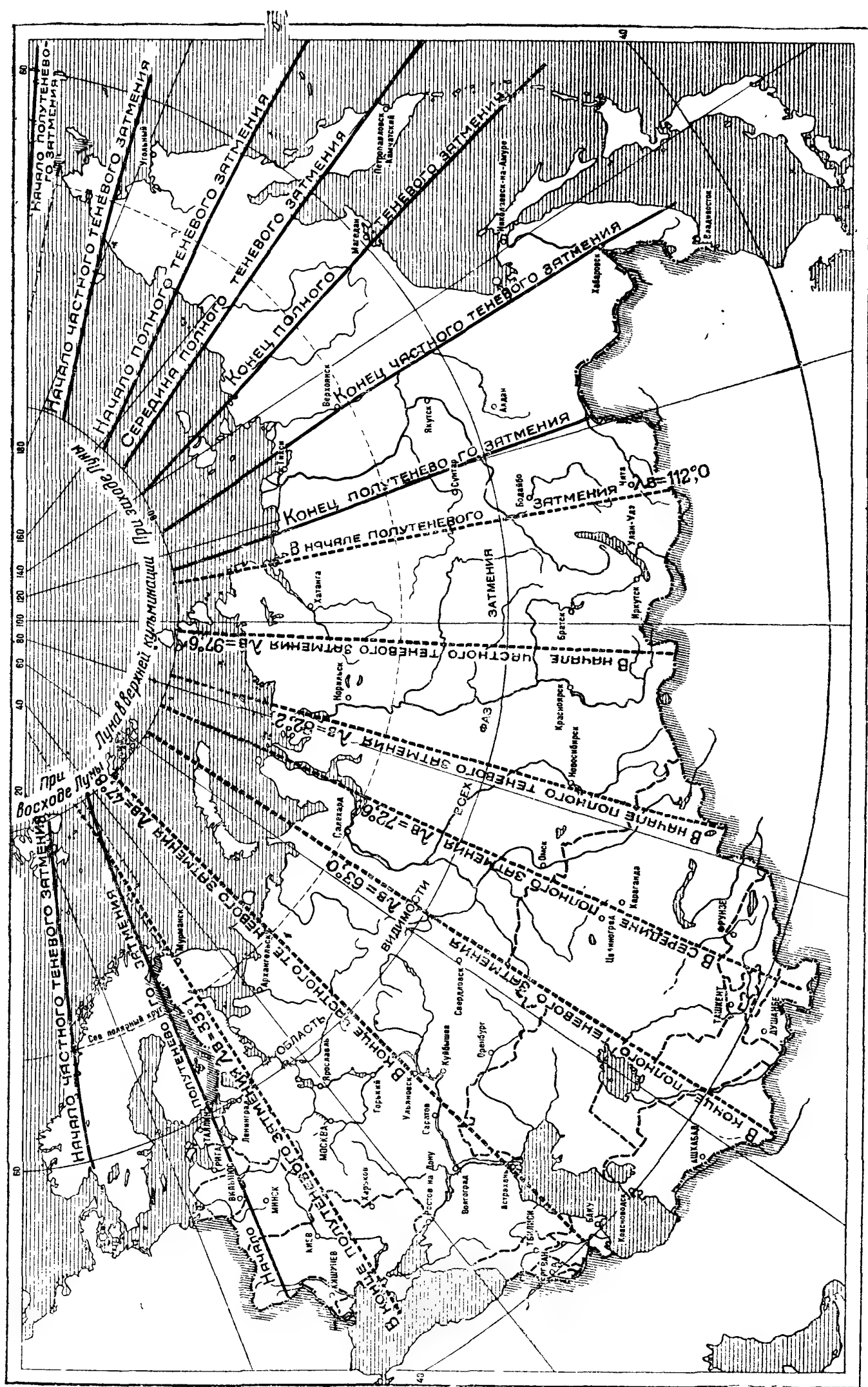


Рис. 33. Карта полного лунного затмения 16 сентября 1978 г. Буквами λ , отмечены меридианы, на которых Луна находится в верхней кульминации.

Имитировать лунные затмения можно на опыте, описанном на стр. 75, для чего шарик, изображающий Луну, следует перемещать за глобусом, в его тени. Различная степень погружения шарика в тень глобуса покажет частные или полные лунные затмения разной продолжительности и наибольшей фазы, а перемещение шарика за глобусом вне его тени продемонстрирует полнолуния без затмения.

Продолжительность лунных затмений зависит от их условий. Частное затмение с небольшими фазами продолжается несколько минут. Полное затмение с наибольшей фазой $\Phi_m = 1$ (касательное затмение при $\sigma = r - r_{\odot}$) длится одно мгновение, а центральное полное затмение может продолжаться почти два часа. Ведь Луна за один час смещается по небу на величину своего видимого диаметра $d_{\odot} = 0^{\circ},5$, а наибольший диаметр земной тени $D = 2,8d_{\odot}$ (рис. 34), и поэтому при центральном затмении Луна может полностью находиться в земной тени на протяжении

$$t = \frac{2,8d_{\odot} - d_{\odot}}{d_{\odot}} = 1,8 \text{ часа,}$$

а вместе с частными фазами продолжительность такого затмения составит

$$t = \frac{2,8d_{\odot} + d_{\odot}}{d_{\odot}} = 3,8 \text{ часа.}$$

При небольших частных фазах лунного затмения земная тень на Луне кажется черной из-за резкого контраста с яркой, незакрытой тенью поверхностью Луны. Но с приближением полной фазы земная тень светлеет, и в полном затмении Луна приобретает бурый, темно-красный, а иногда и красно-кирпичный цвет, который объясняется тем, что солнечные лучи, преломляясь в земной атмосфере, все же попадают на Луну. Но так как красные лучи проходят сквозь земную атмосферу с меньшим преломлением, чем голубые и синие лучи (к тому же значительно рассеиваемые атмосферой), то они преимущественно и достигают лунной поверхности, окрашивая ее в соответствующий цвет, оттенки которого во многом зависят

от чистоты и прозрачности атмосферы Земли. Бывают и такие темные полные лунные затмения, во время которых Луна еле просматривается в земной тени.

Часто ли происходят лунные затмения? Вспомним, что они возможны только в полнолуния, наступающие не далее $10\text{--}12^\circ$ от лунных узлов, т. е. в зоне, протяженностью в среднем около 22° (см. рис. 31), причем в это время Луна перемещается вблизи одного своего

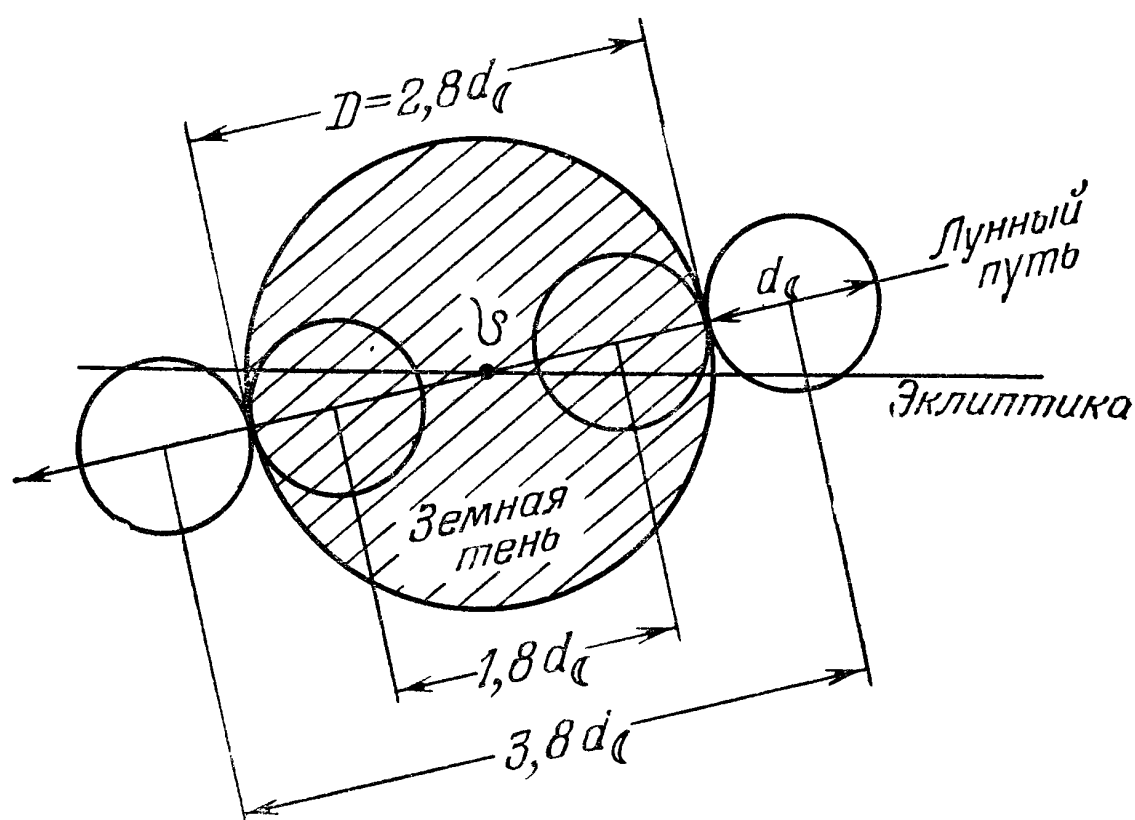


Рис. 34. Продолжительность центрального лунного затмения.

узла, а Солнце — вблизи другого, диаметрально противоположного. Солнце проходит эту зону затмений примерно за 21 сутки, на протяжении которых может наступить только одно полнолуние, а может быть и ни одного, так как они повторяются через синодический месяц $S = 29^{\text{д}},53$. Следовательно, в каждой зоне возможно не более одного лунного затмения (полного или частного), а порой их и совсем не бывает. Обе зоны лунных затмений Луна проходит ежемесячно. Солнце же поочередно вступает в каждую зону через 173 суток, а чтобы вступить в противостояние с Солнцем, Луне требуется еще около 4—5 дней (см. подсчет на стр. 83—84), и поэтому лунные затмения повторяются через 176—178 суток. Таким образом, на протяжении одного календарного года, как правило,

присходит одно-два лунных затмения, в некоторые годы их может не быть вообще, а иногда происходит и третье, которое возможно в самом конце года из-за отступления лунных узлов, при условии, конечно, что первое из трех затмений произошло в начале года.

В заключение отметим, что в очень редких случаях бывает и четыре лунных затмения в год, когда в зоне одного из лунных узлов происходит подряд два затмения, с интервалом в 30 дней, но тогда оба этих затмения и еще одно — обязательно частные полутеневые, а четвертое может быть и частным тeneвым, но с очень небольшой фазой. Это происходит потому, что зона полутеневых лунных затмений простирается до 17° в обе стороны от каждого лунного узла, т. е. имеет протяженность в 34° , и эту зону Солнце проходит за 32 дня, в пределах которых иногда возможны два полнолуния, одно — в начале и другое в конце зоны, а поэтому оба таких лунных затмения могут быть только полутеневыми с малой фазой. Именно такой случай и произошел в 1973 г., когда после частного полутеневого затмения 18 января, через 148 суток, 15 июня произошло частное полутеневое затмение с наибольшей фазой 0,50, а 15 июля — аналогичное затмение с наибольшей фазой 0,13, и затем уже 10 декабря Луна частично, на 0,11 своего диаметра, погрузилась в земную тень.

Наблюдения полных лунных затмений представляют значительный научный интерес, так как позволяют изучать структуру и оптические свойства земной атмосферы, а также тепловые свойства различных участков лунной поверхности, в том числе и изменение их температуры при разных фазах затмения.

Читатель, наверное, уже догадался, что когда с Земли видно лунное затмение, на Луне происходит солнечное затмение, частное — в области земной полутени, и полное — в зоне земной тени, причем продолжительность полной фазы при центральном затмении может достигать 2,8 часа. Кольцеобразных же солнечных затмений на Луне не бывает, так как в лунном небе угловой диаметр Земли в 3,7 раза превышает диаметр солнечного диска.

6. ПЕРИОДИЧНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ И ЛУННЫХ ЗАТМЕНИЙ

Последовательность солнечных и лунных затмений зависит от условий наступления новолуний и полнолуний вблизи лунных узлов. Представим себе, что новолуние наступило в 10° к западу от лунного узла и поэтому произошло полное солнечное затмение. Через 15 суток, когда Солнце сдвинется по эклиптике на 15° , пройдет этот узел и будет находиться в $4-5^\circ$ к востоку от него, настанет полнолуние на таком же расстоянии от противоположного узла, — значит, произойдет полное лунное затмение, а еще через 14—15 суток, к следующему новолунию, Солнце будет уже в $19-20^\circ$ от узла, т. е. выйдет из зоны затмений. Следовательно, на протяжении около 30 суток произойдет одно полное солнечное и одно полное лунное затмение. Если же полное солнечное затмение наступит в 2° к западу от лунного узла, то к очередному полнолунию Солнце окажется примерно в $12-13^\circ$ градусах восточнее узла, и лунного затмения совсем не произойдет*). Но если частное солнечное затмение случится в $14-15^\circ$ к западу от узла (и поэтому оно будет с небольшой фазой), то через полмесяца Солнце и Луна подойдут к самим узлам, произойдет продолжительное полное лунное затмение, а еще через две недели наступит очередное новолуние примерно в $14-15^\circ$ восточнее того же узла и, следовательно, опять произойдет частное солнечное затмение с небольшой фазой. Поэтому всегда между двумя частными солнечными затмениями, разделенными интервалом времени в 30 суток, обязательно происходит одно полное лунное затмение.

Как мы уже знаем, на протяжении одного календарного года происходит от 2 до 5 солнечных и от 0 до 3 лунных затмений и, казалось бы, наибольшее число затмений в году равно 8. Однако здесь, образно говоря, арифметика «нарушается». Вспомним, что пятое солнечное и третье лунное затмение происходит из-за смещения лунных узлов навстречу Солнцу и

*) Напомним, что мы рассматриваем только теневые лунные затмения.

Луне, и поэтому лишь одно из них может произойти в конце текущего календарного года, а второе придется уже на начало следующего. Таким образом, наибольшее число затмений в одном календарном году не превышает семи, и тогда они чередуются в такой последовательности: либо в начале года солнечное — лунное — солнечное, в середине года солнечное — лунное — солнечное и в конце года солнечное, т.е. пять частных солнечных и два полных лунных, либо в начале года лунное — солнечное, в середине года солнечное — лунное — солнечное и в конце года солнечное — лунное, т.е. четыре частных солнечных и три полных лунных затмения. Однако такие сочетания крайне редки и обычно на протяжении года происходит 2—3 солнечных и 1—2 лунных затмений, т.е. первые бывают примерно в полтора раза чаще вторых. В среднем за 100 лет происходит 238 солнечных затмений (83 кольцеобразных, 71 полное и 84 частных) и 154 лунных, из которых около половины — полные. Тем не менее лунные затмения наблюдаются значительно чаще только потому, что они видны со всего ночного полушария Земли, в то время как солнечные — только из области лунной тени и полутени, да к тому же частные солнечные затмения не привлекают к себе внимания и потому проходят незаметно.

Солнечные и лунные затмения неизбежно повторяются, так как их наступление зависит от трех периодов: периода смены лунных фаз, или синодического месяца $S = 29^д,53$, периода возвращения Луны к одному из лунных узлов, или драконического месяца $S_{\Omega} = 27^д,21$ и периода возвращения Солнца к тому же лунному узлу, или драконического года $T_{\Omega} = 346^д,62$. Легко подсчитать, что

$$223 \cdot S = 223 \cdot 29^д,53 = 6585^д,32,$$

$$242 \cdot S_{\Omega} = 242 \cdot 27^д,21 = 6585^д,35$$

и

$$19 \cdot T_{\Omega} = 19 \cdot 346^д,62 = 6585^д,78.$$

Следовательно, каждое затмение повторяется через период в 6585 суток = 18 лет 11 дней (или 10 дней, если в этом периоде содержалось пять високосных лет), названный древними греками саросом.

На протяжении сароса в среднем происходит 70—71 затмение, из которых 42—43 солнечных (14 полных, 13—14 кольцеобразных и 15 частных) и 28 лунных. Однако по истечении сароса каждое затмение повторяется в несколько иных условиях, так как он не содержит целого числа суток, а за избыток около $\frac{1}{3}$ суток (сверх 6585 дней) Земли повернется вокруг оси примерно на 120° и поэтому лунная тень пробежит по земной поверхности на те же 120° западнее, чем 18 лет назад, да и Солнце с Луной будут на несколько иных расстояниях от лунного узла.

В виде примера приведем четыре полных солнечных затмения, разделенных саросом (в скобках указаны районы движения лунной тени):

1936 г. 19 июня (Северный Кавказ, Урал, Сибирь)

+ 18 лет 11 дней

1954 г. 30 июня (Белоруссия, Украина, Кавказ)

+ 18 лет 11 дней

1972 г. 11 июля (Сахалин, Камчатка, Чукотка)

+ 18 лет 11 дней

1990 г. 22 июля (Эстония, Карелия, Арктика).

Как видим, лунная тень повторяющегося через сарос солнечного затмения пробегала (и пробежит) по различным районам нашей страны. И тем не менее древние культурные народы (египтяне, китайцы, вавилоняне, индийцы, халдеи и др.) уже за 2500 лет до нашей эры, еще не зная причин затмений, умели предсказывать их наступление с точностью до одних-двух суток в пределах своей ограниченной территории. В одной из священных книг «Сурья-сидджанта» древних индийцев были даже в стихотворной форме приведены правила, по которым жрецы совершенно механически предсказывали наступление затмений. И не случайно эти правила оказались в священной книге: ведь по древним поверьям Солнце и Луна обожествлялись, и необходимо было заранее знать, когда следует ожидать нападения на них злых духов и чудовищ с тем, чтобы принять меры к их спасению.

Древние народы могли предсказывать наступление затмений на своей территории потому, что они использовали для этого не современный сарос, а его

утроенное значение в 19756 дней (54 года 33 дня — 32 дня), полученное из длительных наблюдений, скрупулезно отмечавшихся в летописях по принятым у этих народов календарям. При использовании периода в 19756 суток излишка в $\frac{1}{3}$ суток (сверх 6585 дней) не получалось, поскольку $3 \times \frac{1}{3} = 1$ суткам, и предсказанные затмения проходили на той же территории, но, конечно, уже с несколько иными фазами. Строго говоря, именно этот период в 19756 суток древние греки называли саросом, что в переводе на русский язык означает повторение. Следовательно, прибавляя этот период к датам прошедших затмений, нетрудно было предсказать даты, с точностью до 1—2 суток, ожидаемых затмений. Правда, в связи с постепенно изменяющимися условиями повторения затмений изредка какое-то затмение не наступало, но остальные чередовались в правильной последовательности. Об ожидавшихся, но несостоявшихся затмениях тоже имеются записи в древних летописях.

Принято считать, что большой сарос в 19756 суток был впервые обнаружен древневавилонскими астрономами-жрецами, но, по всей вероятности, некоторые народы открыли его самостоятельно, иначе трудно объяснить его применение в Древнем Китае, на территории которого существовали царства, не поддерживавшие сношений с другими государствами. Так или иначе, но установление сароса было одним из великих открытий древности, поскольку заставило искать истинную причину затмений, которая и была найдена уже в VI веке до н. э., но тем не менее ее знание оставалось привилегией узкого круга ученых и жрецов, причем последние использовали это в корыстных целях ради поддержания и возвышения своего авторитета.

Однако реальная закономерность повторения затмений более сложна, чем она представлена саросом. Точное отражение этой закономерности имелось бы только в том случае, если бы все три периода, объединяемые саросом, были соизмеримы друг с другом, т. е. содержали целое число суток, часов или даже минут. Но, как мы видели, синодический месяц, драконический месяц и драконический год несоизмеримы между собой и поэтому повторяющиеся через сарос затмения

происходят в несколько иных условиях. Так, по истечении сароса (6585,3 суток), Луна не доходит до своего прежнего положения относительно лунного узла на $0^{\circ},474$.

Назовем серией, или цепочкой, затмений их совокупность, представляющую повторение через сарос одного и того же затмения. Если в какой-то день полное солнечное затмение этой серии произошло в самом лунном узле и имело наибольшую продолжительность, то через 6585,3 суток Луна не дойдет до того же узла, а окажется на расстоянии около $0^{\circ},47$ к западу от него, и поэтому полное солнечное затмение произойдет на таком же расстоянии к западу от узла и будет иметь меньшую продолжительность. Еще через сарос (18 лет 11 дней) такой сдвиг опять повторится, и полное солнечное затмение произойдет на расстоянии $0^{\circ},94$ к западу от того же лунного узла, а по истечении очередного сароса — уже на расстоянии $1^{\circ},41$ к западу от узла и т. д. Но граница зоны полных солнечных затмений отстоит от лунного узла в среднем на 11° , и поэтому через 24 сароса (примерно через 430 лет) Луна окажется уже вне этой зоны, и вместо полного (или кольцеобразного) солнечного затмения произойдет частное. Пройдет еще около 250 лет (13—14 саросов), и Луна удалится от своего узла более чем на 17° , т. е. вообще выйдет из зоны солнечных затмений, и на этом данная серия их прекратится. Но взамен нее возникнет новая серия солнечных затмений, которая начнется в 17° восточнее лунного узла в виде частного затмения очень малой фазы и, постепенно сдвигаясь к западу, превратится в центральные затмения, а пройдя узел и отойдя от него на 11° , затмения снова станут частными, и наконец и эта серия затмений окончится.

Одна серия солнечных затмений существует от 66 до 74 саросов (в среднем 70 саросов), или от 1190 до 1330 лет, и состоит из 18—32 частных и соответственно из 48—42 центральных затмений. Начинается она кратковременным частным затмением с ничтожной фазой всегда вблизи одного из полюсов Земли. Через 18 лет 11 дней лунная полутень охватывает уже несколько большую зону полярной области Земли, фаза частного затмения увеличивается, и оно становится

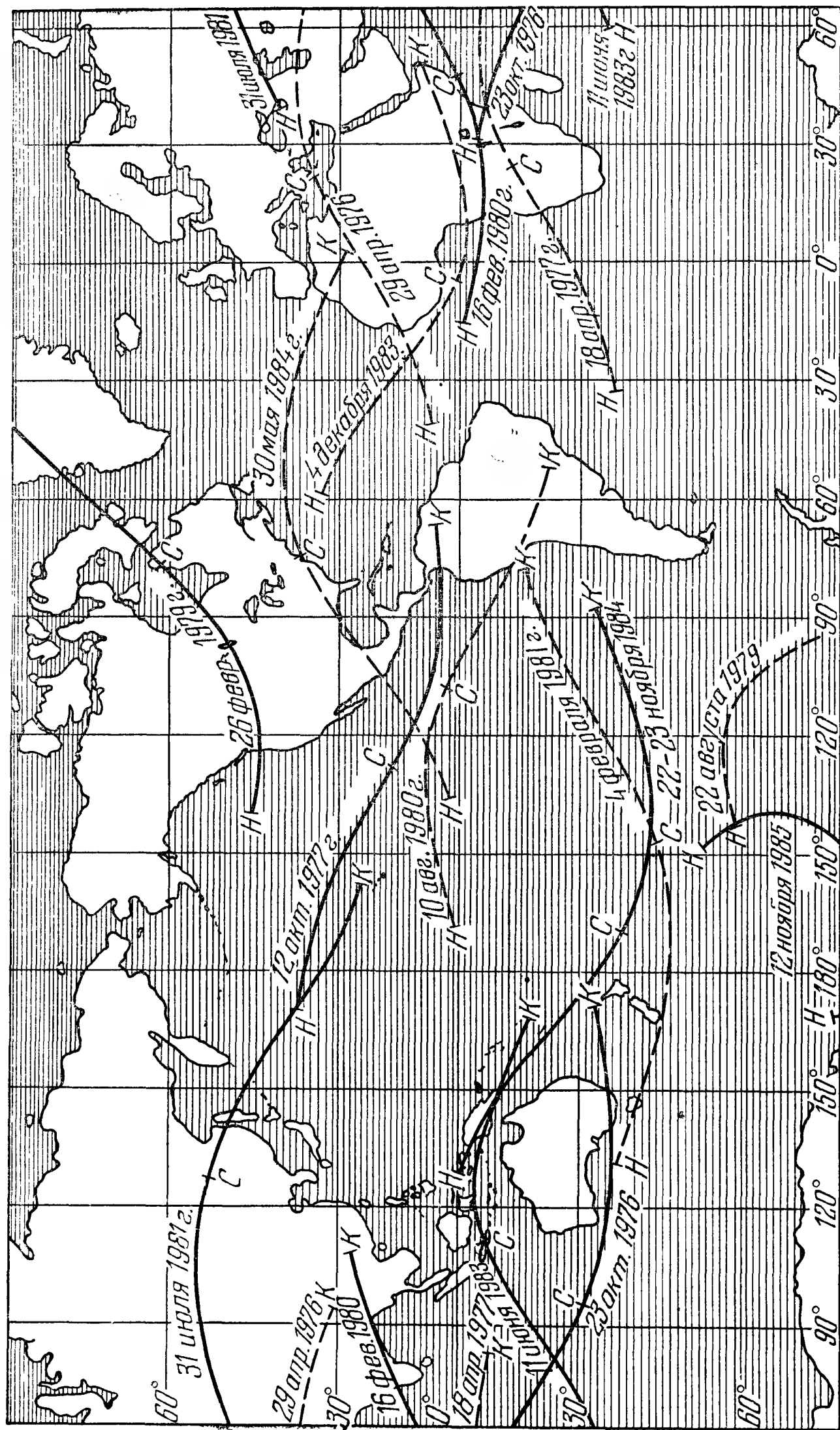


Рис. 35. Центральные линии солнечных затмений: сплошные — полных, прерывистые — кольцеобразных; H — начало затмения при восходе Солнца, C — середина затмения в полдень, K — окончание затмения при заходе Солнца.

более продолжительным. Так, на протяжении от 9 до 16 саросов при очередном частном затмении лунная полутень постепенно опускается из полярной зоны в умеренную, и наконец в район того же полюса вступает лунная тень — начинается последовательность центральных солнечных затмений. Через каждый сарос эти затмения происходят все ближе к лунному узлу, и лунная тень (с полутенью) постепенно из полярной зоны перемещается в умеренный пояс земной поверхности, а когда затмения подойдут к узлу, то лунная тень промчится по тропической зоне Земли. Далее, по мере отхода затмений от узла тень и полутень начнут переходить в умеренную зону противоположного земного полушария, затем — в его полярную зону и, наконец, вблизи полюса лунная тень соскользнет с Земли. Так оканчивается период центральных затмений, длящийся от 48 до 42 саросов, после которого, на протяжении от 9 до 16 саросов, снова повторяются частные затмения, но уже с убывающей фазой.

Что касается лунных затмений, то каждое из них повторяется в серии от 42 до 50 раз (от 42 до 50 саросов), причем от 18 до 22 затмений бывают полными.

В настоящее время вычислены даты предстоящих солнечных и лунных затмений вплоть до 3000 года. В виде примера на рис. 35, заимствованном из американского журнала «Sky and Telescope» № 2, 1976 г., показаны центральные линии нескольких прошедших и предстоящих ближайших полных и кольцеобразных солнечных затмений. За период с апреля 1978 г. по ноябрь 1985 г. на Земле произойдет 6 полных, 5 кольцеобразных и 7 частных солнечных затмений, но в Советском Союзе будут видны только одно полное (31 июля 1981 г.) и два частных затмения (2 октября 1978 г. и 15 декабря 1982 г.).

7. ПРОСТЕЙШИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЛУННЫХ ЗАТМЕНИЙ

Наблюдения лунных, особенно полных, затмений дают обширный материал для изучения структуры земной тени и полутени, а также состояния верхних

слоев земной атмосферы. Ряд весьма полезных наблюдений лунных затмений вполне может быть выполнен простейшими средствами, которыми располагают даже средние учебные заведения и любители астрономии. К таким наблюдениям относятся оценки общего (интегрального) блеска *) Луны в разных фазах затмения, оценки ее цвета и отдельных деталей ее поверхности, определение моментов начала и окончания затмения, моментов покрытия земной тенью деталей лунной поверхности и их появления из земной тени и другие наблюдения.

Оценки интегрального блеска Луны в разных фазах затмения могут быть проведены различными способами. Один из них состоит в том, что Луна рассматривается в небольшой телескоп или в бинокль со стороны объектива, а окуляр инструмента наведен на Луну. В этом случае Луна будет выглядеть почти звездообразной, но все же довольно яркой. Поэтому заранее, в предыдущие полнолуния, необходимо подобрать несколько подходящих дымчатых (нейтральных) светофильтров, чтобы ослабить блеск Луны до блеска звезд нулевой звездной величины, например, Веги (α Лиры), Арктура (α Волопаса), Капеллы (α Возничего) или Ригеля (β Ориона). Также заранее следует наметить около 20 звезд с блеском от 0^m до 5^m (звездной величины), с которыми будет сравниваться блеск Луны в затмении. Эти звезды сравнения подбираются в областях неба, отстоящих от места расположения Луны не ближе 60° , что легко осуществить по картам звездного атласа, наметив на одной из них положение Луны (по ее экваториальным координатам) в середине затмения. Звезды сравнения лучше всего отобрать по звездным атласам акад. А. А. Михайлова (см. стр. 205) и твердо запомнить их взаимное расположение на небе, чтобы в процессе наблюдений затмения безошибочно их отыскивать. Звездные величины отобранных звезд сравнения заимствуются из «Справочника любителя астрономии» П. Г. Куликовского, из «Постоянной ча-

*) Блеском небесного светила называется интенсивность его света, ложащегося до наблюдателя. К сожалению, иногда блеск называют яркостью, что противоречит понятиям физики.

сти Астрономического календаря» или из какого-либо иного звездного каталога.

На протяжении всего затмения, через равные промежутки времени, близкие к 5 минутам, блеск Луны (наблюдаемой в перевернутый оптический инструмент) сравнивается с блеском звезд, наблюдаемых невооруженным глазом, подобно тому как изучается блеск переменных звезд путем его сравнения со звездами неизменного блеска. Наступит момент, когда Луна сквозь светофильтр будет видна очень слабой; тогда необходимо светофильтр убрать и продолжать наблюдения без него.

Можно поступить иначе: укрепить на подставке несколько блестящих полированных шаров (например, шаров из елочных украшений) и сравнивать блеск отраженной в них Луны с блеском звезд сравнения, применяя в случае необходимости перевернутый бинокль. Словом, задача состоит в том, чтобы получить изображение Луны, как можно ближе соответствующее звездообразному. При оценках блеска моменты времени отмечаются по выверенным часам с точностью до 1 минуты.

Сравнение интегрального блеска Луны с блеском звезд сравнения наиболее целесообразно проводить дифференциальным методом Э. Пикеринга. Пусть в некоторый момент времени одна из звезд сравнения, обозначенная буквой a , несколько ярче звездообразного изображения Луны (L), а другая звезда, обозначенная буквой b , несколько слабее него. Различие в блеске этих двух звезд сравнения мысленно делится на 5 или 10 частей (степеней) и оценивается число степеней p и q , отделяющих блеск Луны от блеска звезд сравнения; оценка блеска записывается в виде $apLqb$ и означает, что звезда a на p степеней ярче звездообразного изображения Луны, а оно в свою очередь на q степеней ярче звезды b . Сумма $p + q$ всегда должна быть равна числу, на которое разделено различие в блеске звезд сравнения, т. е. либо $p + q = 5$, либо $p + q = 10$. Например, при делении интервала блеска между звездами сравнения a и b на 5 частей запись $a2L3b$ означает, что звезда a ярче звездообразного изображения Луны на 2 степени, а оно ярче звезды b на 3 степени (сумма

$2 + 3 = 5$). При делении того же интервала на 10 частей запись $a3L7b$ показывает, что звезда a ярче звездообразного изображения Луны на 3 степени, а оно ярче звезды b на 7 степеней (сумма $3 + 7 = 10$). Совершенно очевидно, что вторая запись более точна, но она требует и более длительной тренировки, осуществляемой по наблюдениям звезд различного блеска. Наблюдения блеска Луны необходимо провести также до начала и по окончании затмения.

Зная звездную величину m_a и m_b звезд сравнения, нетрудно вычислить, уже после наблюдений, значение одной степени блеска

$$v = \frac{m_b - m_a}{p + q},$$

по которому найти звездную величину m изображения Луны в момент наблюдений, поскольку

$$m = m_a + pv = m_b - qv.$$

Получив значение m_0 блеска звездообразного изображения Луны перед затмением и после него, а также ряд значений блеска Луны m_i (т. е. $m_i = m_1, m_i = m_2, m_i = m_3$ и т. д.) в различные моменты затмения следует сопоставить изменение блеска с фазой затмения Φ , которая для тех же моментов времени либо заимствуется из раздела затмений Астрономического календаря-ежегодника текущего года, либо вычисляется по моментам времени (см. стр. 168). Это сопоставление осуществляется двумя способами. В первом способе, образовав из наблюдений разности $\Delta m_i = m_i - m_0$ для различных моментов затмения и принимая блеск Луны в полнолунии $m_0 = -12^m,7$, находят блеск Луны $m_i = m_0 + \Delta m_i$ при различных фазах затмения Φ и строят на графике зависимость $m = f(\Phi)$ или $\Delta m = f(\Phi)$. Во втором способе по формуле

$$\lg \frac{E_i}{E_0} = -0,4 \Delta m_i,$$

принимая $E_0 = 1$, вычисляют величину E_i , характеризующую блеск Луны, и строят график $E = f(\Phi)$. В обоих способах можно построить зависимость m , Δm или E от времени.

Если в распоряжении наблюдателя имеется фотоэкспонетр (с фотоэлементом), то изменения инте-

грального блеска Луны в затмении может быть изучено по его показаниям. Для этого следует перед входным отверстием фотоэкспонетра жестко установить трубку таких размеров, чтобы она защищала фотоэлемент от рассеянного света неба, а сквозь нее проходил бы только свет от Луны. Так, при длине трубки 30 см ее внутренний диаметр должен быть равен 5 мм. Внутреннюю поверхность трубки покрывают черной матовой краской или черной тушью. Фотоэкспонетр с трубкой укрепляют на тубусе небольшого телескопа с соблюдением параллельности трубки тубусу. При наблюдениях телескоп направляют на Луну и все время ведут за ней. Показания фотоэкспонетра характеризуют блеск Луны. Аналогичный прибор можно изготовить с любым фотоэлементом, чувствительным к визуальным или фотографическим лучам.

Обозначив через I_0 отсчет фотоэкспонетра при незатмившейся полной Луне, а через I его отсчет при некоторой фазе затмения Φ , найдем изменение блеска Луны в затмении $\frac{E}{E_0} = \frac{I}{I_0}$ и ее блеск, выраженный звездной величиной

$$m = m_0 + 2,5 \lg \frac{E_0}{E},$$

где $m_0 = -12^m,7$.

Для изучения изменения блеска Луны во время затмения можно также изготовить простейший трубчатый фотометр из трех параллельных трубок тех же размеров, но во входные отверстия двух из них установить по одной диафрагме диаметром соответственно в 1 и 3 мм. Трубки укрепляются перпендикулярно на крышке небольшой плоской коробочки, размерами со спичечный коробок, на взаимном расстоянии около 10—11 мм, а в крышке, под каждой трубкой, просверливаются отверстия по диаметру трубок, нижние концы которых крепятся вровень с внутренней поверхностью крышки и не должны из нее выступать внутрь коробочки. Внутри коробочки в непосредственной близости к ее верхней крышке должна перемещаться фотографическая пленка, кассеты для которой укрепляются в торцах коробочки. Вся эта установка

должна быть светонепроницаемой с тем, чтобы свет поступал на фотопленку только сквозь отверстия в трубках. Лучше всего, конечно, вместо самодельной коробочки использовать пленочный фотоаппарат, вывинтив из него объектив и ввернув на его место круглую крышку с укрепленными на ней трубками. Верхние концы трубок покрываются матовым стеклом, поверх которого надевается картонная вычерненная светонепроницаемая крышка, выполняющая роль затвора. При использовании фотоаппарата такая крышка не нужна, так как используется затвор фотоаппарата.

Такой трубчатый фотометр укрепляют на небольшом телескопе, направляют на Луну и все время ведут за ней, проводя фотографирование до, после и на протяжении всего затмения с одинаковыми экспозициями в 1—3 сек (зависящими от чувствительности фотопленки) через равные промежутки времени около 5 минут, каждый раз перемещая пленку. Для гашения сильного света Луны вне затмения или при его малых фазах применяют набор нейтральных (дымчатых) светофильтров, подобрать которые, как и продолжительность экспозиции, необходимо заранее по разным фазам Луны. После фотографической обработки пленки на ней проявятся небольшие кружки разной степени почернения, по которой можно судить об изменении интегрального блеска Луны в течение затмения.

Если такой фотометр направить в зенит, то тогда можно изучить изменение освещенности атмосферы в ходе затмения. Еще лучше применить фотометр Фесенкова (см. стр. 116) и изучить распределение освещенности по всему небу.

Интересные результаты могут быть получены регистрацией видимости звезд невооруженным глазом или в 6-кратный бинокль на протяжении всего затмения (включая и его частные фазы) в определенной области неба. Чтобы на результатах наблюдения не сильно сказывалось поглощение света в земной атмосфере, необходимо выбрать область неба с неизменной высотой. Обычно наблюдается либо область вокруг Полярной звезды, либо область зенита.

Во втором случае следует по подвижной карте звездного неба установить, какие именно созвездия будут проходить в области зенита во время затмения.

Предварительно со звездных атласов копируют на кальку избранную область неба со звездами до $6^m,0$ при наблюдениях невооруженным глазом, или до $8^m,2$ — при наблюдениях в бинокль. На полученной копии карты выбирают 30—40 звезд последовательно убывающего блеска от 4^m до 6^m (или до $8^m,2$) и нумеруют их. Задолго до затмения в безлунные ночи изучают взаимное расположение нумерованных звезд, чтобы безошибочно отождествлять их на небе. В течение затмения через каждые 5 минут регистрируют номера наиболее слабых звезд, видимых на пределе зрения. Зная звездную величину отмеченных звезд, легко найти степень ослабления лунного света в различные фазы затмения.

Все описанные наблюдения требуют обязательной регистрации времени с точностью до 1 минуты, а также двух-трех наблюдений до начала затмения и после его окончания.

Цвет затмившейся Луны следует оценивать лишь при полном затмении, описывая его словами. Тем, кто умеет рисовать можно рекомендовать делать зарисовки вида затмившейся Луны с возможно более точной передачей цвета. Наконец, знатоки фотографии могут сфотографировать затмение на цветную пленку. Здесь возможно несколько вариантов. Во-первых, можно получить с одинаковой экспозицией серию снимков (30—35) на обычной короткофокусной пленочной фотокамере. Тогда на пленке получатся почти точечные изображения затмившейся Луны, по которым можно будет судить и о цвете, и об изменении блеска Луны. Во-вторых, можно получить те же снимки сквозь матовое стекло. В этом случае изображения Луны может и не получиться, но изменение цвета и блеска определится по изменяющейся плотности засветки пленки. Наконец, очень полезно прикрепить фотокамеру без объектива к телескопу и фотографировать Луну сквозь объектив телескопа. При фокусном расстоянии объектива в 1 м изображения Луны на фотопленке получатся диаметром около 1 см и на них хорошо будут видны цветовые оттенки.

Цвет затмившейся Луны очень часто оценивается в специальной шкале, предложенной французским астрономом Данжоном:

- 0 — затмение очень темное, в середине затмения Луна почти или совсем не видна;
- 1 — затмение темное, серое, детали поверхности Луны совершенно не видны;
- 2 — затмение темно-красное или рыжеватое, около центра тени наблюдается более темная часть;
- 3 — затмение красно-кирпичного цвета, тень окружена сероватой или желтоватой каймой;
- 4 — затмение медно-красное, очень яркое, внешняя зона светлая, голубоватая.

Однако шкалу Данжона можно применять только при безоблачном участке неба, в котором находится Луна, и при фазах затмения, превышающих 0,8, а еще лучше — только при полном затмении, иначе блеск незакрытой тенью поверхности Луны будет сильно искажать оценки цвета.

Очень полезны наблюдения в 6-кратный бинокль, предложенные проф. В. В. Шароновым и состоящие в регистрации моментов времени (с точностью до 1^м) появления и исчезновения следующих эффектов:

а) при частных фазах затмения — затемненного края Луны на фоне неба, отчетливой видимости затемненного края; признаков красного цвета и четкой видимости красноватого цвета земной тени; видимости контуров и деталей лунных морей в земной тени; разделения земной тени на внешнюю (серую, светлую) зону и среднюю (окрашенную или темную); видимости внутренней темной зоны (ядра) земной тени; хорошей видимости лунных кратеров в земной тени;

б) при полном затмении — окраска краевых зон лунного диска (зеленая, золотисто-желтая, оранжевая) и одинаковый цвет всего диска.

Эти наблюдения полезно выполнять как без светофильтров, так и сквозь светофильтры голубого, зеленого, желтого, оранжевого и красного цвета.

Степень видимости деталей лунной поверхности в 6-кратный бинокль желательно наблюдать на протяжении всего затмения, включая и его полутеневые

фазы. Оценивать видимость можно по пятибалльной шкале:

- 4 — видимость отличная;
- 3 — видимость хорошая;
- 2 — видимость удовлетворительная;
- 1 — видимость плохая, объект еле виден;
- 0 — объект совсем не виден.

Схематическая карта расположения на лунной поверхности объектов, наблюдения которых желательны, показана на рис. 36, где номерами обозначены:

- 1. Океан Бурь, восточный край;
- 2. Море Влажности;
- 3. Море Облаков;
- 4. Темное пятно к югу от Моря Влажности;
- 5. Восточная ветвь Моря Холода;
- 6. Западная ветвь Моря Холода;
- 7. Залив Росы;
- 8. Залив Радуги;
- 9. Залив Срединный;
- 10. Море Паров;
- 12. Западный край Моря Ясности;
- 13. Западный край Моря Спокойствия;
- 14. Западный край Моря Изобилия;
- 15. Южная оконечность Моря Изобилия;
- 16. Море Кризисов (Опасности);
- 17. Море Волн;
- 18. Северная область Моря Нектара;
- 19. Южная область Моря Нектара;
- 20. Перемычка в Море Нектара;
- 21. Темные пятна к югу от Моря Нектара;
- 23. Озеро Смерти;
- 24. Озеро Сновидений.

КРАТЕРЫ И ГОРЫ

- | | |
|---------------------|-----------------------------------|
| 25. Гримальди | 40. Светлая полоса в Море Ясности |
| 26. Шиккард | 41. Аристотель |
| 27. Платон | 42. Евдокс |
| 28. Риччиоли | 43. Горный хребет Апеннины |
| 29. Аристарх | 45. Лангрэн |
| 30. Кеплер | 46. Петавий |
| 31. Коперник | 47. Секки и Тарунций |
| 32. Рифлейские горы | 48. Горы около Цензорина |
| 33. Буллиальд | 49. Посидоний |
| 35. Тихо | 50. Геродот |
| 36. Лучи Тихо | 51. Менелай |
| 37. Архимед | 52. Геркулес |
| 38. Манилий | 53. Атлас |
| 39. Плиний | |

Изучить расположение этих объектов необходимо заранее, особенно в период полнолуния, когда наблюдения затруднены ярким лунным светом, поначалу применяя дымчатые светофильтры для ослабления блеска Луны. При наблюдениях тех же объектов на протяжении всего затмения светофильтрами уже пользоваться нельзя, но зато необходимо отмечать

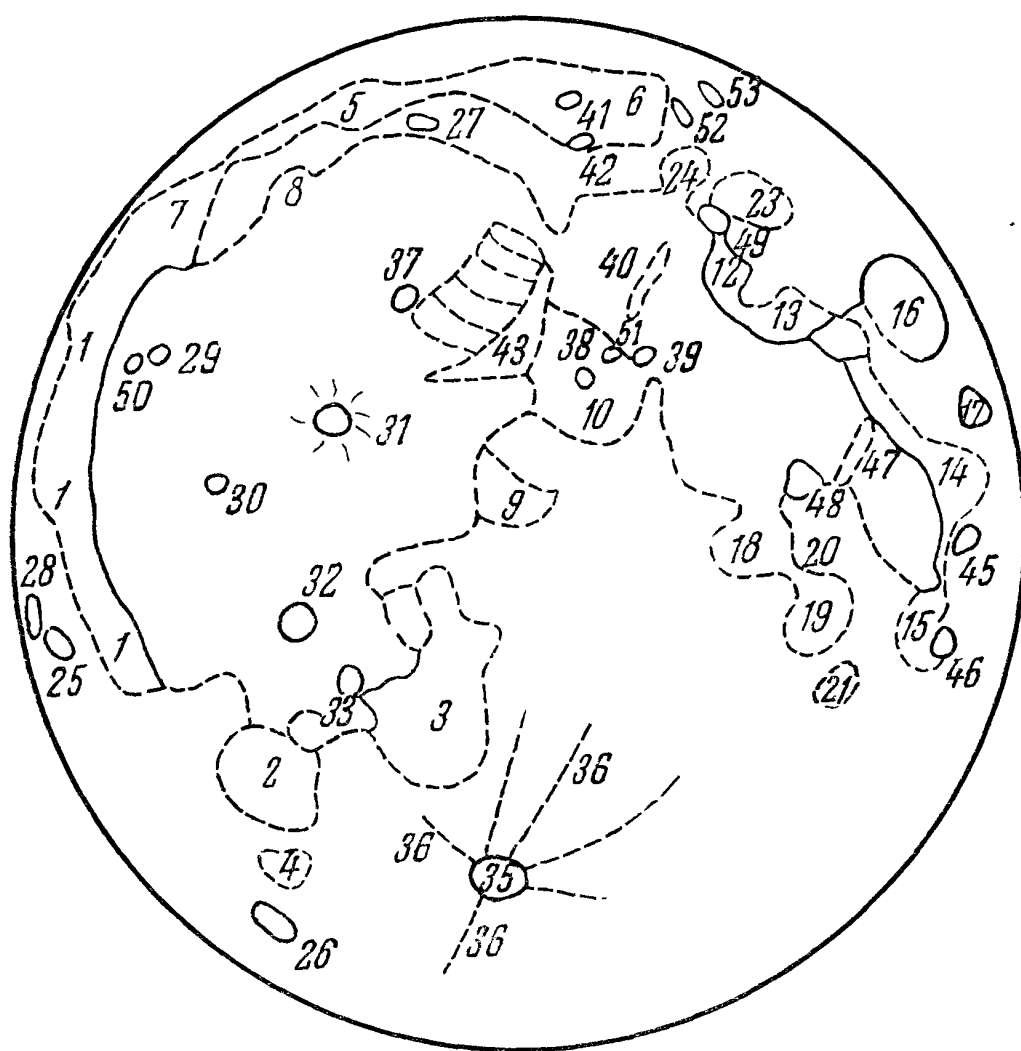


Рис. 36. Схематическая карта объектов лунной поверхности.

моменты исчезновения и появления объектов, а также все замеченные особенности, как-то: внезапные потемнения, свечение, изменение окраски и т. п. Моменты времени отмечаются с точностью до 10—15 секунд.

Но далеко не всегда объекты лунной поверхности бывают невидимыми в земной тени. Поэтому весьма полезно проводить наблюдения их покрытий земной тенью (а если удастся, то и земной полутенью), т. е. явления соприкосновения тени (полутени) с лунными объектами. Такие наблюдения вполне возможны даже в небольшие телескопы школьного типа. Чтобы наблюдения были успешными, следует выбрать на

мелкомасштабной фотографии Луны или ее схематической карте 25—30 хорошо заметных объектов в разных местах лунного диска и во время затмения отмечать с точностью до 5—10 сек моменты их покрытия земной тенью и моменты схода с них тени. Эти наблюдения проводятся с наибольшим увеличением телескопа.

Если вдруг, что иногда бывает, наблюдатель заметит земную тень вне лунного диска, то следует попытаться оценить ее размеры путем сравнения с диаметром диска или с угловыми расстояниями между определенными звездами. Эти расстояния в угловых единицах определяются по картам звездных атласов и их масштабам уже после затмения. Нелишне подробнее описать вид земной тени вне Луны, неровности ее контура, сжатие и цветовые оттенки.

Совершенно очевидно, что все перечисленные наблюдения абсолютно невозможно выполнить одному наблюдателю. Поэтому весьма желательны коллективные наблюдения, при которых каждый наблюдатель проводит один вид наблюдений.

В заключение отметим, что способы наблюдений переменных звезд, применяемые при оценке интегрального блеска Луны в затмении, подробно изложены в книгах В. П. Цесевича «Что и как наблюдать на небе» и «Переменные звезды и способы их исследования», а рекомендации к наблюдениям лунных затмений — в книге Н. Н. Сытинской «Луна и ее наблюдение» и в «Постоянной части Астрономического календаря».

8. ПРОСТЕЙШИЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

Прежде всего нужно твердо запомнить, что вне затмения или при частных фазах затмения смотреть на Солнце без защиты глаз темными светофильтрами категорически запрещено. Это предупреждение особо относится к наблюдениям Солнца в оптические инструменты, так как пренебрежение им вызовет мгно-

венное и неизлечимое повреждение глаз. Поэтому перед объективом оптического инструмента нужно обязательно укрепить темный светофильтр достаточной плотности, чтобы глаза не ощущали раздражения солнечным светом. Без защиты глаз можно смотреть на Солнце только во время полной фазы солнечного затмения, когда Солнце совсем закрыто Луной.

Наблюдения частных фаз солнечного затмения не представляют интереса, разве что только попытаться отметить с точностью до 1 секунды моменты внешних контактов лунного диска с солнечным в самом начале и в самом конце затмения. Вблизи же полной фазы и в течение нее даже простейшие наблюдения представляют значительный интерес, особенно если моменты некоторых явлений отмечать с точностью до 1 сек. Так как длительность полной фазы затмения очень мала, то подготовка к наблюдениям должна проводиться заранее, а сами наблюдения выполняться быстро и четко.

При возможности проведения наблюдений на возвышенной местности с открытым горизонтом можно проследить за движением лунной тени, для чего по карте солнечного затмения следует заранее установить направление ее движения и в этом направлении выбрать на местности (от горизонта до горизонта) 10—12 ориентиров — одиноко стоящие деревья, границу леса и луга, телеграфные столбы, отдельные высокие строения, вышки и прочие хорошо заметные предметы, расстояния до которых определить либо по крупномасштабной карте местности, либо тригонометрическим способом, описанным в любом школьном учебнике по тригонометрии. Когда фаза солнечного затмения станет близкой к 0,9 и от закрытого Луной солнечного диска останется только узкий серп, нужно начать внимательно всматриваться (невооруженным глазом или в бинокль) в том направлении, откуда должна появиться лунная тень. Скорость лунной тени близка к 1 км/сек и поэтому она необычайно быстро промчится по выбранным ориентирам. Задача наблюдателя, отсчитывая секунды вслух, заметить моменты пробегания по ориентирам переднего края тени при ее приближении и заднего края при ее удалении.

В течение нескольких десятков секунд до и после полной фазы затмения иногда наблюдаются бегущие тени в виде чередующихся волнистых светлых и темных полос, хорошо заметных на белом фоне. Для наблюдений бегущих теней можно использовать белую стену здания, обращенную к Солнцу, или расстеленную на земле белую простыню, в нескольких местах прижатую камнями, с тем, чтобы возможные порывы ветра не сорвали ее. Задачи наблюдателей состоят в определении направления движения бегущих теней, расстояния между темными полосами и их ширины, а также скорости их движения. Проще всего предварительно изготовить две тонкие деревянные планки, длиной в 1 м каждая, или воспользоваться двумя школьными классными линейками, и в момент появления бегущих теней непосредственно перед самым полным затмением быстро положить одну из линеек на простыню в направлении движения теней. Вторую планку (линейку) расположить по движению теней после окончания полной фазы затмения. Один наблюдатель укладывает планки, а два или три других обязаны сосчитать число темных и светлых полос, одновременно укладывающихся на длине планки, и отметить интервал времени, за который одна темная полоса пробегает по планке, а также запомнить цветовые оттенки теней, если они появятся. Можно попытаться сфотографировать бегущие тени на высокочувствительную фотопленку, с очень малой экспозицией, хотя это и не всегда удастся из-за их значительной скорости. Более эффективной была бы киносъемка бегущих теней на высокочувствительную кинопленку.

Буквально за 2—3 секунды до наступления полной фазы затмения, когда на Солнце уже можно смотреть невооруженным глазом, на его левом краю, окончательно закрываемом Луной, вспыхивают светлые точки, разделенные темными промежутками. Это просвечивает сквозь долины и ущелья между лунными горами край солнечного диска. Цепочка таких светлых точек называется четками Бэйли, по имени первого их наблюдателя. Интересно отметить момент появления и продолжительность видимости четок Бэйли в начале и при окончании полного затмения (теперь

уже на правом краю Солнца). Полезно отметить моменты начала и окончания полной фазы затмения.

При полной фазе затмения хорошо видна солнечная корона, но при особенно ясном небе она может появиться около правого (западного) края Солнца, закрытого Луной, за 10—20 секунд до начала полной фазы. Чтобы ее увидеть, нужно заслонить каким-нибудь непрозрачным экраном незакрытый Луной солнечный серп, и тогда отметить момент появления короны, ее форму, цвет и протяженность, выраженную в диаметрах солнечного или лунного диска. Аналогичные наблюдения следует провести и по окончании полной фазы затмения, но уже около левого края Солнца, отметив момент исчезновения короны.

При полном затмении нужно оценить протяженность солнечной короны и попытаться схематически зарисовать ее общую форму и наиболее яркие и протяженные лучи, обращая внимание на уплотнения и сгустки в них, завитки и искривления лучей. Для этого лучше всего заранее приготовить шаблон: на листе плотной бумаги, укрепленной на картоне или фанере, нарисовать черный диск диаметром 4—5 см и концентрично вокруг него еще две-три прерывистые окружности (последняя — радиусом в 15—16 см), а также их диаметры, под углом в 30° друг к другу. Такой шаблон поможет быстро набросать основные контуры и лучи короны, их наиболее заметные уплотнения и особенности. Остальные подробности наносятся на рисунок по-памяти, уже после исчезновения короны. Необходимо обратить внимание на цвет короны или ее отдельных частей и лучей, описывая его словами. Это существенно потому, что встречаются различные оценки цвета короны, от серебристо-белого до зеленоватого.

Если в хромосфере Солнца видны красновато-розовые выступы — протуберанцы, то их тоже следует показать на рисунке, по возможности в принятом масштабе. Наблюдатели, умеющие рисовать, могут выполнить рисунок солнечной короны в красках, наиболее приближающихся по оттенкам к цвету различных ее частей.

Но если имеется возможность, то желательно сфотографировать солнечную корону, как на обычной,

так и на цветной фотопленке разной чувствительности, с экспозициями от 3 до 20 сек, с тем, чтобы получить несколько фотографий различных участков короны. Однократное фотографирование короны не позволяет изучить распределения яркости в ней, так как неизбежно внешняя ее зона выйдет недодержанной, а внутренняя, более яркая зона — передержанной. Фотографирование короны может быть осуществлено на низкочувствительной фотопленке или на диапозитивных фотопластинках. Соответствующая этим фотоматериалам камера прикрепляется к небольшому телескопу, объектив которого послужит объективом камеры. При фокусном расстоянии объектива телескопа в 80 см изображение лунного диска на фотонегативе получится в виде кружка диаметром около 8 мм. Поэтому для фотографирования далеких участков короны лучше использовать фотопластинки размерами 9×12 см и более, или применить объектив с небольшим фокусным расстоянием.

Очень полезны наблюдения изменения освещенности неба в течение затмения, которые следует начинать до полного затмения и оканчивать после него при частных фазах, близких к 0,9. Эти наблюдения, как и при лунных затмениях, можно провести фотоэкспометром или трубчатым фотометром, установив их неподвижно в направлении на зенит и отмечая показания (или проводя экспозиции) до и после полной фазы через 1—1,5 минуты, а в течение нее — через 20—30 секунд. Если имеется возможность использовать несколько трубчатых фотометров или фотоэкспометров, то полезно провести такие наблюдения со светофильтрами разного цвета, укрепив их над трубками. Перерывы между экспозициями осуществляются простыми картонными заслонками или крышками. Экспозиции для каждого прибора должны быть одинаковой длительности, которая, в зависимости от чувствительности фотопластинок или фотопленки, подбирается заранее по различной освещенности сумеречного светлого и темного неба.

Более ценными являются наблюдения освещенности различных участков неба, которые могут быть проведены простым и легким в изготовлении трубчатым фотометром акад. В. Г. Фесенкова. Разрез этого

фотометра показан на рис. 37. В деревянной коробке смонтировано 25 трубок длиной 12 см и внутренним диаметром 6—8 мм, причем в середине каждой трубки вставлена диафрагма диаметром в 4—5 мм. Внутренняя поверхность трубок покрыта черной матовой

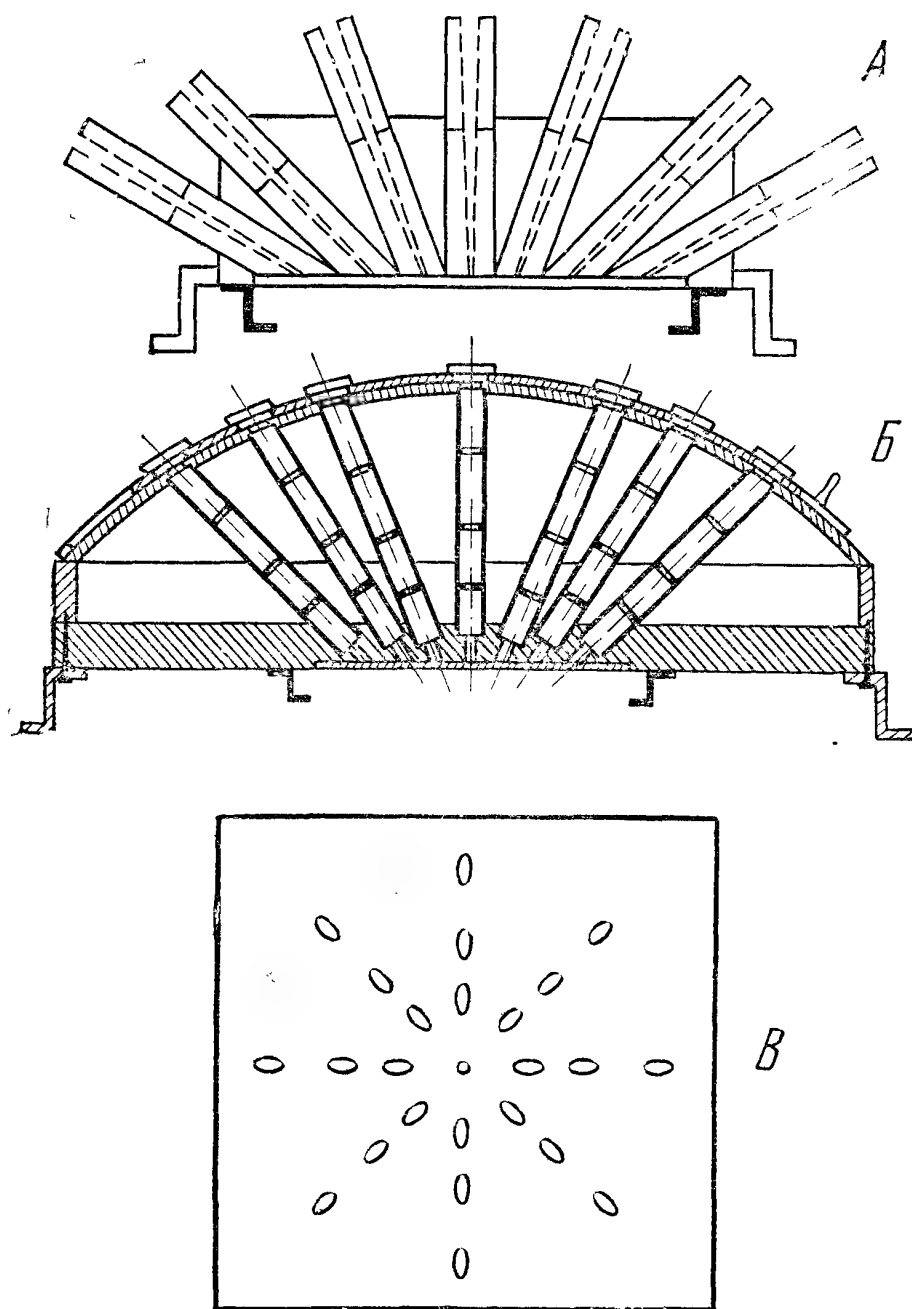


Рис. 37. Разрез фотометра В. Г. Фесенкова. А — трубчатый вариант, Б — усовершенствованный вариант, В — расположение отверстий в дне фотометра.

краской или черной тушью. Одна трубка устанавливается вертикально, а остальные симметрично вокруг нее под углами в 30° , 45° и 60° к вертикали. Дно ящика представляет собой металлическую пластину с 25 отверстиями диаметром в 1 мм, к которым прижимаются нижние концы трубок. С внешней стороны к пластине плотно прилегает кассета с фотопластинкой размерами 9×12 см, поддерживаемая уголковыми салазками и перемещающаяся по ним. Передвигая

кассету, можно получить на одной фотопластинке 4—5 экспозиций. В результате на фотонегативе получатся маленькие кружочки различной плотности, по которым можно судить об изменении освещенности различных участков неба. Между экспозициями следует накрывать фотометр картонной крышкой. Полезно провести такие наблюдения со светофильтрами различного цвета. Конечно, можно изготовить аналогичный фотометр и иных размеров, например, под фотопленку.

Изменение освещенности зенитной области неба на протяжении затмения легко определить путем многократного ее фотографирования (с одинаковыми экспозициями) любой фотопленочной камерой, неподвижно установленной объективом вверх. В результате последовательные кадры фотопленки будут иметь различные почернения, по которым нетрудно решить поставленную задачу.

Освещенность земной атмосферы при разных фазах затмения можно изучить также по многократному фотографированию с одинаковой экспозицией одного и того же ландшафта.

Наконец, можно рекомендовать простейшие метеорологические наблюдения, например, измерение через каждые 5 минут (во время полной фазы — через 0,5—1 минуту) температуры воздуха по расположенному в тени термометру, температуры почвы, силы или скорости ветра по анемометру или ветромерной дощечке и определение его направления. Если в распоряжении наблюдателя имеются метеорологические приборы-самописцы, то весьма желательно их использовать на протяжении всего затмения.

9. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ АСТРОМЕТРИИ

Для того чтобы понять принципы вычислений обстоятельств солнечных и лунных затмений, необходимо познакомиться с некоторыми сведениями из того раздела астрономии, который разрабатывает и применяет способы определения видимого положения небесных светил, а также системы счета времени, и называется астрометрией.

Мы уже упоминали о том, что из-за колоссальной удаленности от Земли все небесные светила представляются нам расположенными на внутренней поверхности огромной сферы (см. стр. 31). И хотя в природе такой сферы не существует, тем не менее эта кажущаяся поверхность, называемая небесной сферой, является удобным средством для определения видимого положения и взаимного расположения небесных светил.

Центр небесной сферы, вообще говоря, может находиться в любой точке пространства, но нагляднее представлять его в глазу наблюдателя, коль скоро наблюдатель сам видит себя в центре этой сферы.

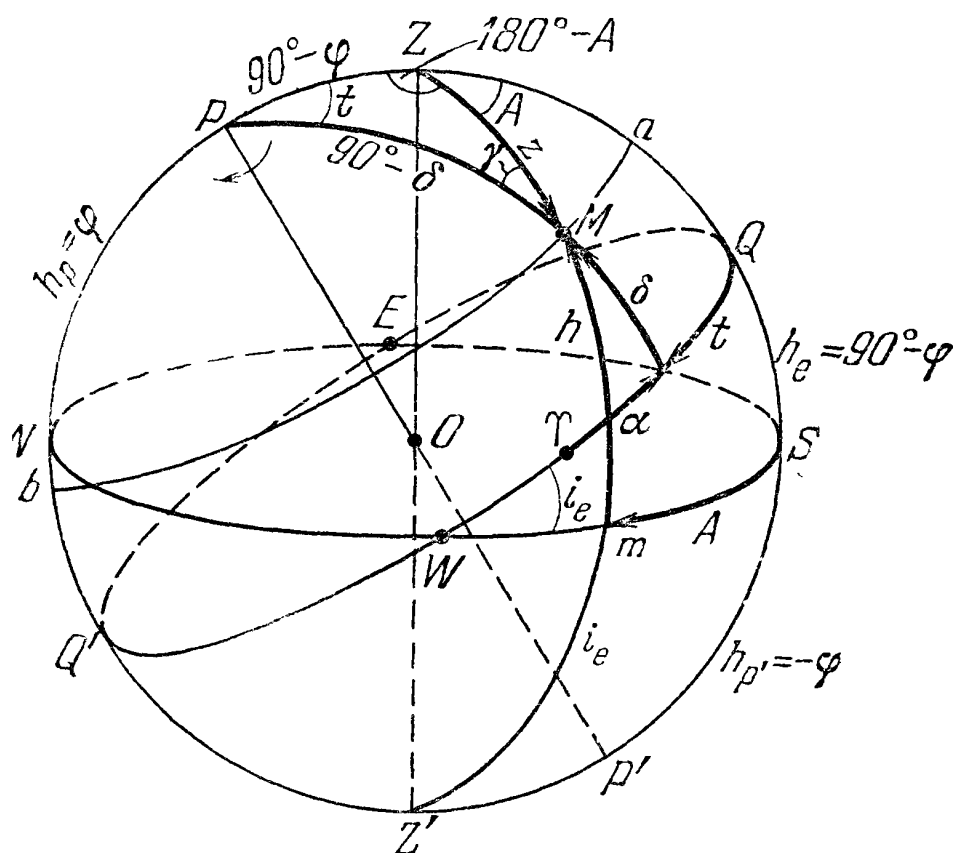


Рис. 38. Небесная сфера, небесные координаты и параллактический треугольник.

Радиус небесной сферы тоже может быть произвольным, но все же лучше полагать его сколь угодно большим, превышающим расстояния до наиболее удаленных небесных объектов.

Некоторые элементы небесной сферы, такие как небесный экватор, ось и полюсы мира, уже рассмотрены нами. Теперь необходимо познакомиться с другими ее элементами. Отвесная линия (рис. 38) пересекает небесную сферу в двух точках, одна из которых называется зенитом (Z) и находится как раз над го-

ловой наблюдателя (O), а другая — надиром (Z') и не видна, так как скрыта земной поверхностью. Большой круг ($NESW$) небесной сферы, плоскость которого перпендикулярна к отвесной линии (ZOZ'), называется истинным или математическим горизонтом. Его положение на небе отличается от видимого горизонта, профиль которого зависит от рельефа местности. Поэтому в теории условия видимости небесных светил определяются по их расположению относительно истинного горизонта: над ним светила видны, под ним — не видны, а находящиеся на нем в данный момент восходят или заходят. Небесный экватор (QQ') пересекается с истинным горизонтом в точках востока (E) и запада (W).

Большой круг ($PZSP'Z'N$), проходящий через полюсы мира (P и P'), зенит (Z) и надир (Z'), называется небесным меридианом и делит небесную сферу на восточную (с точкой E) и западную (с точкой W) полусферы. Небесный меридиан образован на небе плоскостью земного меридиана, на котором находится наблюдатель (O), и пересекается с истинным горизонтом в точках юга (S) и севера (N), отстоящим от точек востока и запада ровно на 90° .

Угловое расстояние от истинного горизонта называется высотой, которая над ним считается положительной (высота $h > 0$), а под ним — отрицательной ($h < 0$). В северном полушарии Земли (см. рис. 38) высота северного полюса мира (P) $h_p = \varphi$, а высота южного полюса мира (P') $h_{p'} = -\varphi$, где φ — географическая широта местности *).

Небесный экватор пересекается с истинным горизонтом под углом $i_e = 90^\circ - \varphi$ и на такой же высоте $h_e = i_e = 90^\circ - \varphi$ находится наивысшая точка (Q) небесного экватора, лежащая на небесном меридиане над точкой юга (S).

Видимое положение любой точки небесной сферы, как и любого небесного светила, может быть определено не только экваториальными координатами (см. стр. 42), но и горизонтальными координатами, для чего через зенит (Z) и надир (Z') проводят большие

*) В дальнейшем все выводы даются для северного полушария Земли.

полукруги, называемые кругами высоты или вертикалами. Эти круги пересекаются с истинным горизонтом под прямым углом (90°) и неподвижны относительно наблюдателя. Каждое светило M (см. рис. 38) в любой момент времени всегда находится на одном из вертикалов ($ZMmZ'$) и поэтому положение светила определяется двумя горизонтальными координатами — высотой h (угловым расстоянием mM от истинного горизонта) и азимутом A (дугой Sm), отсчитываемым по истинному горизонту от точки юга (S) к западу, т. е. по вращению стрелок часов. Высота h измеряется в пределах от 0° (истинный горизонт) до $+90^\circ$ (высота зенита) и от 0° до -90° (высота надире), а азимут A — от 0° до 360° , хотя часто его считают положительным к западу (от 0° в точке юга S до $+180^\circ$ в точке севера N) и отрицательным к востоку (от 0° до -180° в точке севера).

В практике значительно проще измерять не высоту h светила, а его расстояние от зенита, именуемое зенитным расстоянием z (на рис. 38 $z = ZM$), причем для любого светила всегда

$$z = 90^\circ - h. \quad (9.1)$$

Зенитное расстояние всегда положительно и может иметь значения от 0° (в зените Z) до 180° (в надире Z').

Поскольку в суточном вращении неба светила движутся по небесным параллелям вокруг оси мира (на рис. 38 светило M — по параллели aMb), то они непрерывно переходят с одного вертикала на другой, их высота, зенитное расстояние и азимут непрерывно изменяются и имеют определенные значения лишь в соответствующие им моменты времени, что позволяет заранее вычислять эти координаты.

Связь между экваториальными (α и δ) и горизонтальными (A и h) координатами светила осуществляется посредством сферического треугольника, вершинами которого служат полюс мира P , зенит Z и светило M , а сторонами — зенитное расстояние z светила M , его расстояние $PM = 90^\circ - \delta$ от полюса мира и зенитное расстояние $PZ = 90^\circ - \varphi$ самого полюса мира (см. рис. 38). Но прямое восхождение α светила необходимо заменить изменяющейся пропор-

ционально времени координатой, называемой часовым углом t , который отсчитывается от южной половины небесного меридиана по небесному экватору в сторону вращения неба (т. е. к западу) и за сутки изменяется от 0 до 360° , или в единицах времени от 0^h до 24^h . Часовой угол точки весеннего равноденствия Υ (дуга $Q\Upsilon$ на рис. 38), выраженный в единицах времени, служит мерой звездного времени S и тогда у любого светила часовой угол

$$t = S - \alpha, \quad (9.2)$$

где α — прямое восхождение этого светила.

Поэтому-то координаты t и α чаще всего выражаются в единицах времени, для чего используются таблицы 1 и 2 на стр. 201—202.

Легко видеть, что в сферическом треугольнике PZM , называемом параллактическим, угол при полюсе мира равен часовому углу t светила, а угол при зените равен $180^\circ - A$, где A — азимут светила. Теперь следует воспользоваться двумя интересными теоремами сферической тригонометрии — теоремой косинусов и теоремой синусов.

Теорема косинусов: косинус какой-либо стороны сферического треугольника равен произведению косинусов двух других его сторон плюс произведение синусов этих сторон на косинус угла между ними.

Теорема синусов: синусы сторон сферического треугольника пропорциональны синусам противолежащих им углов.

Тогда, в соответствии с теоремой косинусов,

$$\cos z = \cos (90^\circ - \delta) \cdot \cos (90^\circ - \varphi) + \\ + \sin (90^\circ - \delta) \cdot \sin (90^\circ - \varphi) \cos t$$

или

$$\cos z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t, \quad (9.3)$$

а по теореме синусов

$$\sin z \cdot \sin A = \cos \delta \cdot \sin t. \quad (9.4)$$

Поднимаясь над горизонтом в восточной половине неба, светила достигают наибольшей высоты (наименьшего зенитного расстояния) в небесном меридиане, когда пересекают его к югу от полюса мира

(на дуге $PZSP'$). Наивысшее положение или верхняя кульминация светила наступает при его часовом угле $t = 0^\circ = 0^h$. Тогда из формулы (9.3) следует

$$\cos z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi,$$

откуда

$$z = \varphi - \delta \quad (9.5)$$

(при $\delta < \varphi$; $A = 0^\circ$, т. е. верхняя кульминация к югу от зенита, над или под точкой юга S), или

$$z = \delta - \varphi \quad (9.6)$$

(при $\delta > \varphi$; $A = 180^\circ$, т. е. верхняя кульминация к северу от зенита, между Z и P или над точкой севера N).

Измеряя зенитное расстояние z светила с известным склонением δ , находят по формулам (9.5) и (9.6) географическую широту φ места наблюдения (местности).

После верхней кульминации светила опускаются к горизонту в западной половине неба.

В моменты восхода и захода светило должно находиться на самом истинном горизонте и поэтому, казалось бы, его зенитное расстояние $z = 90^\circ$. Но преломление световых лучей в земной атмосфере (атмосферная рефракция, от латинского *refractus* — преломленный) приводит к тому, что точечное светило (звезда, планета) видно над горизонтом на небольшой высоте, зависящей от состояния атмосферы, в среднем на $35'$. Если же точечное светило видно на самом истинном горизонте, то в действительности находится под ним, и тогда у светила $z = 90^\circ 35'$.

Но моментом восхода (захода) Солнца считается появление (исчезновение) верхнего его края, отстоящего от центра солнечного диска на $16'$ (вспомним, что угловой диаметр Солнца $d = 32' \approx 0^\circ,5$), и поэтому в этот момент центр солнечного диска находится на зенитном расстоянии

$$z = 90^\circ + 35' + 16' = 90^\circ 51'$$

и тогда согласно формуле (9.3)

$$\cos 90^\circ 51' = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t, \quad (9.7)$$

где δ — склонение Солнца и t — его часовой угол, причем обе эти координаты определяют положение центра солнечного диска.

При восходе и заходе Луны необходимо еще учитывать ее видимое или параллактическое смещение из-за ее близости к Земле. В самом деле, когда наблюдатель O (рис. 39) видит Луну на своем истинном

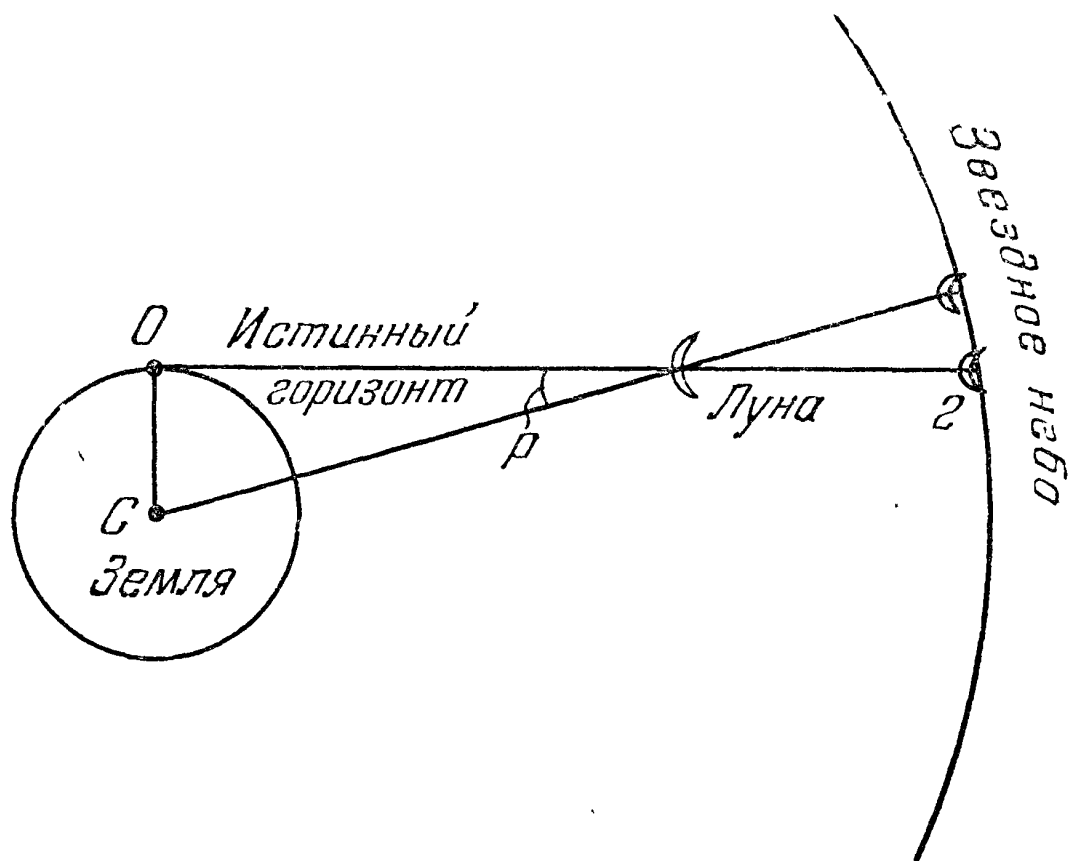


Рис. 39. Горизонтальный параллакс Луны.

горизонте (или, как говорят астрономы, в горизонте), в области 2 звездного неба, то из центра C Земли Луна видна в области 1, т.е. выше истинного горизонта наблюдателя O на угол p , называемый горизонтальным параллаксом. Но наблюдателей на земной поверхности множество, и невозможно для каждого из них показывать положение Луны на небе ее экваториальными координатами. Поэтому в астрономических календарях (ежегодниках) всегда публикуются геоцентрические экваториальные координаты (α и δ) Луны, определяющие ее положение на небе по наблюдениям из центра Земли. Наблюдатель же на земной поверхности видит Луну при восходе и заходе ниже, чем ее геоцентрическое положение, вследствие чего истинное зенитное расстояние z Луны всегда меньше видимого, т.е.

$$z = 90^\circ + 35' + r - p, \quad (9.8)$$

где r — радиус лунного диска, p — горизонтальный параллакс Луны и $35'$ — средняя рефракция в горизонте.

Здесь мы не приводим числовых значений r и p , так как обе эти величины зависят от геоцентрического расстояния Луны. Видимый радиус r Луны меняется в пределах от $14'40''$ до $16'46''$, а ее горизонтальный параллакс p , даже при одном геоцентрическом расстоянии, несколько различен в разных местах Земли из-за ее сплюснутости у полюсов. В экваториальной зоне Земли, с наибольшим радиусом $R_0 = 6378$ км, горизонтальный параллакс Луны тоже наибольший и называется горизонтальным экваториальным параллаксом p_0 . В остальных местах земной поверхности, отстоящих от центра Земли на расстоянии R ,

$$p = p_0 \frac{R}{R_0}. \quad (9.9)$$

Поэтому в астрономических справочниках и ежегодниках публикуются только значения горизонтального экваториального параллакса p_0 , меняющегося в пределах от $53'55''$ до $61'31''$.

Для территории СССР вполне достаточно принимать $R = 0,998 R_0$, что с учетом формулы (9.9) дает различие

$$p_0 - p = p_0 - p_0 \frac{R}{R_0} = p_0 \left(1 - \frac{R}{R_0}\right) = 0,002 p_0$$

и даже при наибольшем значении $p_0 = 61'31'' = 3691''$ разность $p_0 - p = 0,002 \cdot 3691'' \approx 7''$.

Но из-за нестабильности состояния земной атмосферы рефракция в горизонте может изменяться в пределах двух-трех десятков минут дуги и, следовательно, не имеет смысла учитывать изменения видимого радиуса и горизонтального параллакса Луны в несколько минут, а тем более — секунд дуги. Поэтому при вычислении моментов восхода и захода Луны вполне достаточно принимать средние значения $r = 15',6$ и $p_0 = 57',5$, а в формулах (9.3) и (9.8) полагать ее зенитное расстояние

$$z = 90^\circ + 35' + 15',6 - 57',5 = 89^\circ 53',1 = 89^\circ 53'.$$

По этой же причине при вычислении моментов восхода и захода Солнца никогда не учитывают его горизонтального экваториального параллакса $p_0 = 8'',794$, но при вычислениях обстоятельств затмений часто приходится учитывать значения горизонтальных параллаксов Солнца и Луны с точностью до $1''$, а иногда и до $0'',1$.

В жизни мы пользуемся одной системой счета времени и хорошо знаем, что в дальних местностях, расположенных к востоку от Москвы, время отличается от московского на целое число часов. Так, время в Ташкенте на 3^h больше московского времени, а во Владивостоке и Хабаровске — на целых 7^h . Но далеко не все знают, что в астрономии используются различные системы счета времени, одни из которых учитывают только суточное вращение Земли, а другие, кроме суточного вращения, еще ее обращение вокруг Солнца и даже неравномерность ее движения. Помимо этого, приходится считаться с необходимостью удобства счета времени для населения, а также с обнаруженными за последние десятилетия очень незначительными, но все же существующими неравномерностями во вращении Земли. Все это привело к созданию многих систем счета времени, которых мы здесь, конечно, рассматривать не будем, а остановимся только на самых необходимых для правильного восприятия последующего изложения.

Прежде всего будем считать суточное вращение Земли равномерным, а время измерять часовым углом точки весеннего равноденствия, выраженным в единицах времени — часах, минутах и секундах. Такая система счета времени получила название звездного времени, а период вращения Земли назван звездными сутками, длительность которых принята равной 24 звездным часам. Если в какой-либо момент времени какая-то звезда находилась в верхней кульминации (в меридиане), то после одного оборота Земли вокруг своей оси (поворота на 360°), т. е. по истечении одних звездных суток, та же звезда снова окажется в верхней кульминации. Именно по этим явлениям регулируют часы, идущие по звездному времени и называемые звездными часами. Поворот Земли (или небесной сферы) на 15° соответствует интервалу вре-

мени в $\frac{24^{\text{ч}}}{360^{\circ}} \cdot 15^{\circ} = 1^{\text{ч}} = 60^{\text{м}}$, поворот на 1° — интервалу времени в $\frac{60^{\text{м}}}{15^{\circ}} \cdot 1^{\circ} = 4^{\text{м}}$, а поворот на $15'$ — интервалу в $1^{\text{м}}$ времени. Таким образом, счет времени по углу поворота небесной сферы не представляет затруднений.

Так как звездное время S измеряется часовым углом t_{γ} точки весеннего равноденствия Υ , то всегда $S = t_{\gamma}$, а началом звездных суток считается момент верхней кульминации этой точки, когда $S = t_{\gamma} = 0^{\text{ч}}0^{\text{м}}0^{\text{с}}$. И хотя точки весеннего равноденствия в реальности не существует и поэтому видеть ее нельзя, тем не менее счет звездного времени по ней вести нетрудно, если мы вспомним формулу (9.2)

$$t = S - \alpha,$$

связывающую звездное время S с часовым углом t и прямым восхождением α любого светила. Прямые восхождения звезд определяются астрономами с высокой точностью, и поэтому, когда звезда с известным прямым восхождением α наблюдается в верхней кульминации, ее часовой угол $t = 0^{\text{ч}}$, и следовательно, в этот момент звездное время

$$S = \alpha, \tag{9.10}$$

что позволяет проверять правильность показаний часов, установленных по звездному времени.

Теперь представим себе, что в Гринвиче, от географического меридиана которого отсчитывается к востоку (в сторону вращения Земли) географическая долгота, звездное время $S_0 = 0^{\text{ч}}$, т. е. точка весеннего равноденствия Υ находится в меридиане (рис. 40). Тогда из пункта A с географической долготой λ направление на ту же точку будет параллельным плоскости гринвичского меридиана и образовывать с плоскостью местного меридиана часовой угол t_{γ} , которым определяется звездное время $S = t_{\gamma}$ на всем этом географическом меридиане, в том числе и в пункте A . В соответствии с теоремой о параллельных прямых и их секущей, найдем, что

$$S = S_0 + \lambda, \tag{9.11}$$

т.е. в любом пункте земной поверхности звездное время отличается от гринвичского звездного времени на географическую долготу этого пункта, выраженную в единицах времени (из расчета $1^h = 15^\circ$, $4^m = 1^\circ$, $1^s = 15'$ и $1^c = 15''$; см. табл. 1 и 2 на стр. 201—202).

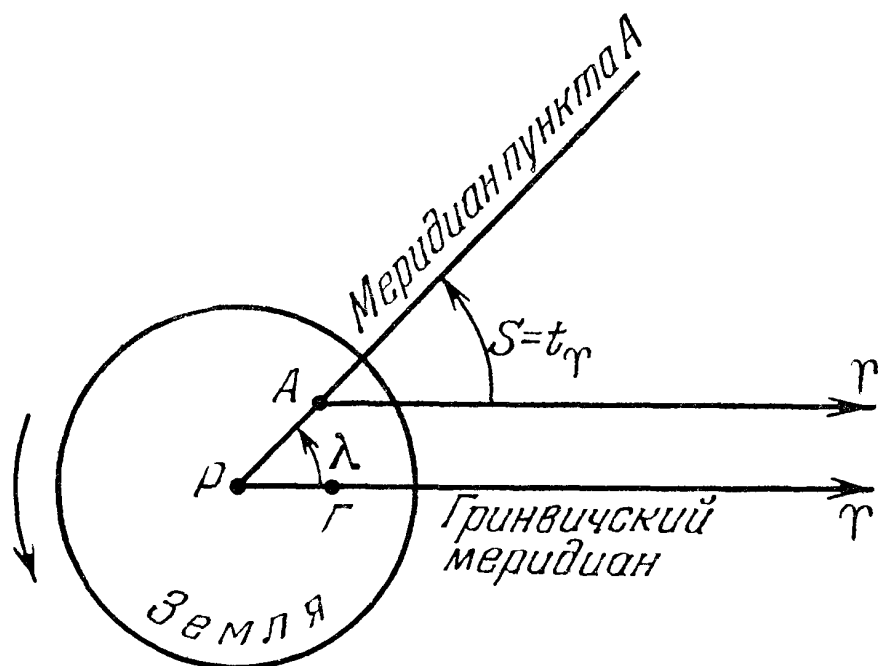


Рис. 40. Связь звездного времени с географической долготой.
 P — северный полюс Земли; Γ — Гринвич.

Формула (9.11) постоянно используется в практике для определения географической долготы λ мест земной поверхности, поскольку

$$\lambda = S - S_0,$$

причем S находится из наблюдений верхней кульминации звезд по равенству (9.10), а S_0 вычисляется по радиосигналам, передаваемым из Гринвича.

Из формулы (9.11) легко показать, что для двух местностей с географической долготой λ_1 и λ_2 различие в звездном времени

$$S_2 - S_1 = \lambda_2 - \lambda_1.$$

Однако эта простая система счета времени совершенно не пригодна для производственно-общественной жизни, поскольку смена дня и ночи зависит от положения Солнца над горизонтом, а не от часового угла точки весеннего равноденствия. Поэтому счет времени на протяжении суток приходится вести по положению Солнца, для чего необходимо учитывать не только вращение Земли, но и видимое годовое движение

Солнца по эклиптике, вызываемое обращением Земли вокруг него.

Представим себе (рис. 41), что в какой-то момент времени, точнее, в момент весеннего равноденствия, Земля находится на своей орбите в положении A , и наблюдатель в пункте O видит на своем небесном меридиане Солнце C в направлении на точку весеннего равноденствия Υ . В этом пункте наступил истинный

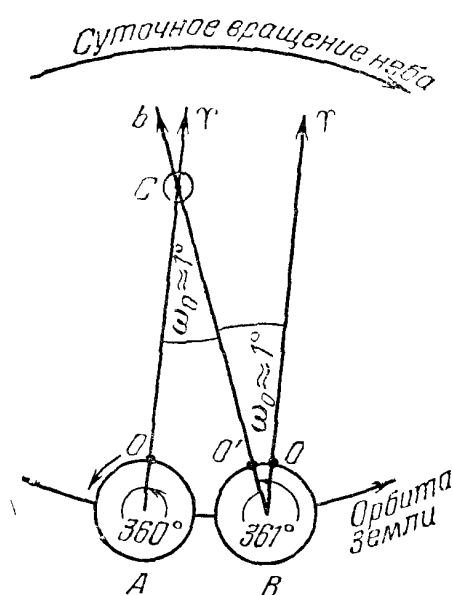


Рис. 41. Различие продолжительности звездных и солнечных суток.

полдень. Через звездные сутки, когда Земля повернется вокруг своей оси на 360° и сдвинется по своей орбите на угол $\omega_0 \approx 1^\circ$ в положение B , меридиан наблюдателя O снова направлен к точке весеннего равноденствия, но Солнце, сместившись по эклиптике к востоку на тот же угол $\omega_0 \approx 1^\circ$, еще не находится в меридиане, а отстоит от него к востоку на этот угол. Чтобы Солнце снова оказалось в меридиане (направление $O'Sb$), т. е. чтобы снова наступил истинный полдень, Земле нужно довернуться на угол

$\omega_0 \approx 1^\circ$, на что требуется около 4 минут времени. Таким образом солнечные сутки соответствуют повороту Земли примерно на 361° и поэтому продолжительнее звездных суток приблизительно на 4 минуты.

Но из-за неравномерного движения Солнца по эклиптике продолжительность солнечных суток несколько непостоянна, и поэтому для счета времени принимают среднюю их продолжительность и называют ее средними сутками (или средними солнечными сутками). Средние сутки всегда продолжительнее звездных суток на $3^m 56^s$, а подразделяются тоже на 24 часа и поэтому один средний час продолжительнее звездного часа на $9^s,86$, одна средняя минута продолжительнее звездной минуты на $0^s,16$, а одна средняя секунда продолжительнее звездной секунды на $0^s,003$. Коль скоро звездные сутки короче средних примерно на 4^m (точнее, на $3^m 56^s$), то период вращения Земли вокруг оси, выраженный в привычных нам единицах среднего времени, составляет не 24^h , как часто упо-

минается в популярных книгах, а $23^{\text{ч}}56^{\text{м}}$ (точнее, $23^{\text{ч}}56^{\text{м}}04^{\text{с}}$).

Буквально во всех областях производственной, научной, культурной и общественной жизни счет времени ведется только средними единицами, но называют их сутками, часами, минутами и секундами, без поясняющих прилагательных, ибо звездные единицы времени там не применяются. И только в астрономии и геодезии используются обе системы счета времени, в связи с чем постоянно приходится переводить моменты и интервалы времени из одной системы счета в другую.

Среднее время в Гринвиче, географическая долгота которого $\lambda = 0$, обозначается буквой T_0 и называется всемирным или универсальным временем потому, что среднее время T_λ в любой местности с географической долготой λ может быть вычислено, подобно звездному времени, как

$$T_\lambda = T_0 + \lambda. \quad (9.12)$$

Однако такая связь в практической жизни неудобна, поскольку местности с различной географической долготой, расположенные в одном административном районе или области, должны жить каждая по своему времени. Чтобы избежать этого неудобства, поверхность земного шара разделена на 24 зоны, называемые часовыми поясами, границы которых тянутся от одного географического полюса к другому и проведены по государственным и административным границам или по естественным преградам — горным хребтам и крупным рекам.

Территории, расположенные в пределах одного часового пояса, имеют одинаковое время, называемое поясным временем. Номер часового пояса, в котором расположена Англия и, следовательно, Гринвич, считается нулевым, а остальные нумеруются последовательными числами от 1 до 23 в восточном направлении. Таким образом, время в соседних часовых поясах различается ровно на $1^{\text{ч}}$, а в каждом часовом поясе поясное время

$$T_n = T_0 + n, \quad (9.13)$$

где n — номер часового пояса, равный целому числу часов

Различие же в поясном времени T_{n_1} и T_{n_2} двух пунктов, расположенных соответственно в часовых поясах n_1 и n_2 , равно разности номеров этих поясов, т. е.

$$T_{n_2} - T_{n_1} = n_2 - n_1.$$

Возвращаясь к прежнему примеру с Москвой, Ташкентом, Хабаровском и Владивостоком, отметим, что Москва находится во втором часовом поясе ($n_1 = 2$), Ташкент — в пятом ($n_2 = 5$), а Хабаровск и Владивосток — в девятом ($n_3 = 9$), и поэтому

$$T_n - T_{n_1} = 5^{\text{ч}} - 2^{\text{ч}} = 3^{\text{ч}},$$

а

$$T_{n_3} - T_{n_1} = 9^{\text{ч}} - 2^{\text{ч}} = 7^{\text{ч}}.$$

Связь между средним солнечным временем

$$T_\lambda = T_0 + \lambda$$

и поясным временем

$$T_n = T_0 + n$$

осуществляется простой разностью,

$$T_n - T_\lambda = n - \lambda.$$

В Советском Союзе действует система поясного времени, но с небольшим изменением, состоящим в том, что территория каждого часового пояса живет не по своему поясному времени, а по времени соседнего восточного пояса, т. е., другими словами, в каждом часовом поясе стрелки часов передвинуты на 1 час вперед. Такое время, введенное декретом Советского правительства, получило название декретного времени, которое действует в большинстве областей, краев и республик нашей страны. Очевидно, что декретное время

$$T_{\text{д}} = T_n + 1^{\text{ч}} \quad \text{или} \quad T_{\text{д}} = T_0 + n + 1^{\text{ч}}, \quad (9.14)$$

где T_0 — всемирное время и n — номер часового пояса.

Тогда между декретным T_d и средним T_λ временем существует связь, вытекающая из формул (9.12) и (9.14):

$$T_d - T_\lambda = n + 1^h - \lambda.$$

Однако в силу ряда причин некоторые края и области нашей страны продолжают применять поясное время, в соответствии с формулой (9.13), и поэтому при пересчете времени нужно быть очень внимательным и иметь перед собой список таких территорий, поскольку одна принадлежность к часовому поясу не дает указаний на использование поясного или декретного времени. Кстати, эти термины используются только в науке, но в жизни их никто не применяет, а действующее на данной территории время просто называют местным временем. Но следует всегда помнить, что это местное время связано не с географической долготой, а с номером часового пояса и является либо поясным, либо декретным.

Чтобы не было путаницы в переводе времени из одной системы в другую и не гадать, какое время принято в определенной местности, лучше всего оперировать не с номерами часовых поясов, а с разностью между местным, т. е. принятым временем T , и московским временем T_m , которое, будучи декретным, отличается от всемирного (гринвичского) времени T_0 ровно на 3 часа, т. е.

$$T_m = T_0 + 3^h. \quad (9.15)$$

Тогда в любой другой местности принятое там время

$$T = T_m + (T - T_m) = T_0 + 3^h + (T - T_m), \quad (9.16)$$

где $(T - T_m)$ — разность с московским временем в целых часах, которая хорошо известна всему населению.

Однако всеми этими формулами следует пользоваться разумно, так как они лишь показывают взаимосвязь моментов времени (или показаний точных, идеально идущих часов) в различных местах земной поверхности, но ничего не говорят об одновременности явлений. Например, солнечные затмения происходят в различных местах в разные моменты времени даже

в одной системе его счета, и поэтому простой пересчет моментов здесь неприменим. Наоборот, лунные затмения начинаются (и оканчиваются) одновременно во всех местах ночного полушария Земли, и поэтому пересчет этих моментов на местное (поясное или декретное) время просто выполняется по формулам (9.15) и (9.16). Так, разность во времени между Читой и Москвой составляет $(T - T_m) = 5^ч$, и если лунное затмение начнется в $T_0 = 14^ч28^м$ по всемирному времени, то в зоне, где действует московское время, оно начнется в $T_m = 14^ч28^м + 3^ч = 17^ч28^м$, а в Читинской области — в момент $T = 17^ч28^м + 5^ч = 22^ч28^м$ по читинскому времени.

Такой простой прием, выраженный формулой (9.16), позволяет отказаться от использования номеров часовых поясов и тем самым избежать путаницы в пересчете времени.

Как было уже сказано, в астрономии используются различные системы счета времени, потому что астрономические явления предвычисляются и регистрируются либо по времени своей местности, либо по всемирному времени, а вид звездного неба и положение на нем небесных светил зависит от звездного времени, что отражено в формулах (9.2) — (9.4). Поэтому постоянно приходится переводить моменты и интервалы времени из звездной системы счета в среднюю систему и обратно, для чего служат таблицы, публикуемые в астрономических календарях и справочниках. Такая таблица помещена на стр. 202 (табл. 3) и служит для перевода интервалов среднего времени (ΔT) в интервалы звездного времени (ΔS), а также для перевода интервалов звездного времени (ΔS) в интервалы среднего времени (ΔT). Следует особо подчеркнуть, что по этой таблице переводятся только интервалы времени, а уже на их основе вычисляются моменты времени в различных системах счета.

Так как звездные сутки короче средних суток на $3^м56^с$, то звездное время ежесуточно опережает среднее время на эту величину, а это означает, что в полночь следующих друг за другом календарных дат значение звездного времени все время увеличивается на $3^м56^с$. Значения звездного времени в гринвичскую полночь (когда в Гринвиче начинается новая календар-

ная дата и всемирное время $T_0 = 0^{\text{ч}}0^{\text{м}}0^{\text{с}}$ публикуются в астрономических ежегодниках на текущий год, в том числе и в выпускаемых издательством «Наука» «Астрономическом ежегоднике СССР» Института теоретической астрономии Академии наук СССР и «Астрономическом календаре-ежегоднике» Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО) при Академии наук СССР. Поэтому при пересчетах времени следует использовать всемирное время.

Пусть для календарной даты m требуется определить звездное время S в некоторый момент T времени (поясного или декретного), действующего в местности с географической долготой λ и отличающегося от московского времени $T_{\text{м}}$ на разность $(T - T_{\text{м}})$ часов. Прежде всего по формуле (9.16) находят всемирное время

$$T_0 = T - 3^{\text{ч}} - (T - T_{\text{м}})$$

и если T_0 оказалось положительным, то дату m следует оставить без изменения и для нее выписать из Астрономического ежегодника звездное время s_0 в гринвичскую полночь. Если же T_0 оказалось отрицательным, то, следовательно, в Гринвиче еще не окончилась предыдущая дата $m - 1$, и тогда s_0 выписывается для ее начала, а отрицательный момент T_0 преобразуется в положительный прибавлением к нему по правилам алгебры $24^{\text{ч}}$.

Положительный момент T_0 означает, что в Гринвиче с полуночи (когда T_0 было равным $0^{\text{ч}}$) до найденного момента T_0 прошел интервал среднего времени $\Delta T = T_0$, который по табл. 3 ($\Delta T \rightarrow \Delta S$) переводится в интервал звездного времени ΔS , а так как в гринвичскую полночь звездное время было s_0 , то в момент T_0 звездное гринвичское время

$$S_0 = s_0 + \Delta S. \quad (9.17)$$

Тогда в упомянутой местности, в момент T по ее времени, звездное время согласно формуле (9.11)

$$S = S_0 + \lambda,$$

где λ выражена в единицах времени.

Если для заданного момента T требуется узнать горизонтальные координаты (A и z или h) светила, экваториальные координаты (α и δ) которого известны, то, вычислив звездное время S , следует воспользоваться формулами (9.1) — (9.3).

В виде примера найдем горизонтальные координаты Солнца в Якутске 2 октября 1978 г. при наибольшей фазе ($\Phi_m = 0,64$) солнечного затмения, наступающей в 15^h38^m по якутскому времени, которое опережает московское время на 6^h . В этот момент прямое восхождение Солнца $\alpha = 12^h32^m02^s$ и его склонение $\delta = -3^\circ27'26''$.

Выпишем необходимые данные для вычислений:

$$T = 15^h38^m, \quad (T - T_m) = 6^h, \quad \lambda = 8^h38^m58^s, \quad \varphi = 62^\circ02';$$

$$\alpha = 12^h32^m02^s, \quad \sin \varphi = 0,88322, \quad \cos \varphi = 0,46896;$$

$$\delta = -3^\circ27',4, \quad \sin \delta = -0,06029, \quad \cos \delta = 0,99818;$$

дата $m = 2$ октября 1978 г.

В указанной выше последовательности вычисляем:

$$T_0 = T - 3^h - (T - T_m) = 15^h38^m - 3^h - 6^h = 6^h38^m,$$

и так как $T_0 > 0$, то в Гринвиче дата $m = 2$ октября 1978 г., для полуночи которой из Астрономического ежегодника СССР на 1978 год выписываем

$$s_0 = 0^h41^m26^s.$$

Далее, по табл. 3,

$$T_0 = \Delta T = 6^h38^m \rightarrow \Delta S = 6^h39^m05^s,$$

$$S_0 = s_0 + \Delta S = 0^h41^m26^s + 6^h39^m05^s = 7^h20^m31^s$$

и

$$S = S_0 + \lambda = 7^h20^m31^s + 8^h38^m58^s = 15^h59^m29^s.$$

Тогда часовой угол Солнца

$$t = S - \alpha = 15^h59^m29^s - 12^h32^m02^s = 3^h27^m27^s$$

или $t = 51^\circ52'$, $\cos t = 0,61749$ и $\sin t = 0,78658$. Следовательно,

$$\begin{aligned} \cos z &= \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t = \\ &= -0,06029 \cdot 0,88322 + \\ &\quad + 0,99818 \cdot 0,46896 \cdot 0,61749 = 0,23580, \end{aligned}$$

откуда $z = 76^\circ 22'$ и $\sin z = 0,97180$, а

$$\sin A = \frac{\cos \delta}{\sin z} \sin t = \frac{0,99818}{0,97180} \cdot 0,78658 = 0,80793$$

и $A = 53^\circ 54'$.

Итак, Солнце будет находиться на зенитном расстоянии $z = 76^\circ 22'$ или на небольшой высоте $h = +13^\circ 38'$, на расстоянии $A = 53^\circ 54'$ к западу от небесного меридиана.

Астрономия настолько точная наука, что она теперь вынуждена считаться с обнаруженными ничтожно малыми неравномерностями вращения Земли и с необычайно незначительным замедлением ее вращения, вызываемым воздействием Луны. В связи с обнаружением этих эффектов, принятое за основу счета и устанавливаемое из наблюдений всемирное время оказалось, строго говоря, не равномерным, и поэтому с 1960 г. в астрономии введено идеальное, равномерно текущее время, названное ньютоновским или эфемеридным временем. Всемирное время T_0 несколько отстает от эфемеридного времени T_e , и разность ΔT_0 между ними, в зависимости от характера неравномерности вращения Земли, ежегодно возрастает на величину от $0^с,2$ до $1^с,8$. В 1978 г. $\Delta T_0 = +47^с = +0^м,8$.

Однако это обстоятельство не должно смущать наблюдателей: если в Астрономическом ежегоднике моменты явления указаны по эфемеридному времени T_e , то, пользуясь разностью ΔT_0 , опубликованной в том же ежегоднике, следует выразить эти моменты по всемирному времени,

$$T_0 = T_e - \Delta T_0,$$

а затем уже проводить необходимые вычисления.

При использовании эфемеридного времени придется отсчитывать долготу точек земной поверхности уже не от гринвичского географического меридиана, а от другого начального меридиана, расположенного к востоку от гринвичского на расстоянии $\Delta \lambda = \Delta T_0$, и отсчитанная от него долгота называется эфемеридной долготой λ_e . Таким образом, при отсчете долготы в обеих системах к востоку географическая долгота

$$\lambda = \lambda_e + \Delta T_0.$$

Что касается часовых углов небесного светила в одноименные моменты всемирного T_0 и эфемеридного T_e времени, то они будут одинаковыми, если при всемирном времени использовать географическую долготу λ , а при эфемеридном времени — эфемеридную долготу λ_e .

Теперь нам осталось познакомиться с определением положения на солнечном диске точек его касания (контактов) с лунным диском при солнечных затмениях и аналогичных точек на лунном диске в моменты контактов Луны с земной тенью и полутенью при лунных затмениях.

Представим себе на небе Луну (рис. 42) при ее внешнем касании с солнечным диском в самом начале

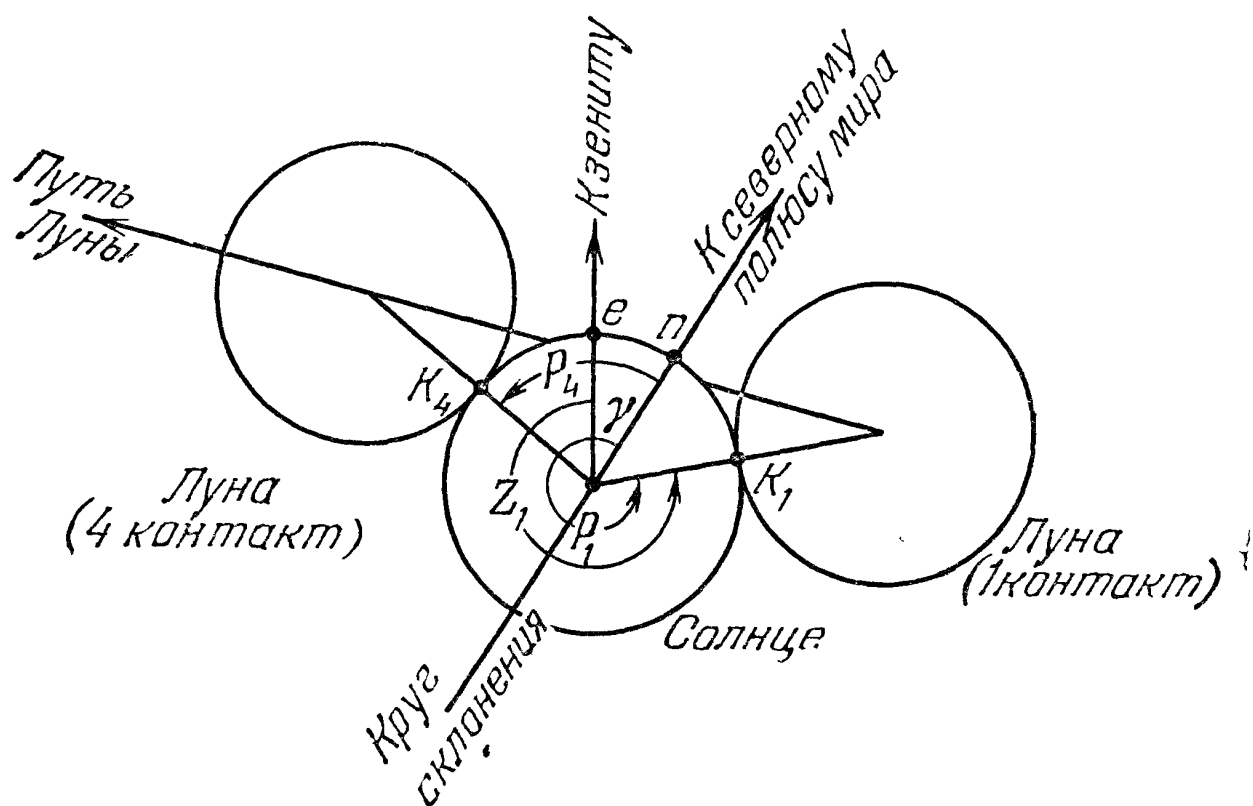


Рис. 42. Позиционные углы точек касания лунного диска с солнечным.

солнечного затмения (1 контакт). Луна движется с запада к востоку и поэтому точка K_1 касания обоих дисков лежит на правом краю солнечного диска, на его радиусе, направленном к центру Луны. Проведем через центр солнечного диска круг склонения и отметим точку n его пересечения с краем диска, обращенную к северному полюсу мира и называемую северной точкой солнечного диска. Положение точки контакта определяется позиционным углом P при центре солнечного диска, отсчитываемым от северной его точки

(n) против направления вращения стрелок часов, т. е. к востоку. Позиционный угол всегда определяет положение солнечного радиуса, направленного к центру лунного диска. При первом контакте (точка K_1) позиционный угол P_1 всегда больше 180° , а в момент окончания солнечного затмения, т. е. при четвертом или последнем контакте, происходящем на левом краю солнечного диска (см. рис. 42, точка K_4), этот угол P_4 меньше 180° . Аналогично определяются позиционные углы точек внутреннего касания при втором и третьем контактах, т. е. соответственно при начале и окончании полного или кольцеобразного затмения.

Однако в практике наблюдений проще определять положение точек касания не от северной точки солнечного диска, а от его верхней точки e , обращенной к зениту (см. рис. 42), т. е. углом Z (его еще обозначают символом P_z), называемым углом положения от зенита. Числовые индексы 1, 2, 3 и 4, проставляемые у позиционных углов P и углов положения от зенита $Z(P_z)$, обозначают номера контактов. При частных солнечных затмениях, когда второй и третий контакты (внутреннее касание) отсутствуют, числовые индексы 1 и 4 внешних контактов часто заменяют буквенными «н» (начало затмения) и «к» (конец затмения).

Связь между позиционным углом P и углом положения от зенита Z легко усмотреть из параллактического треугольника на небесной сфере, одной из вершин которого является центр солнечного диска (см. стр. 120 и рис. 38 и 42). Очевидно,

$$Z = P - \gamma, \quad (9.18)$$

где угол γ , называемый параллактическим углом, вычисляется в соответствии с теоремой синусов по формуле

$$\sin \gamma = \frac{\cos \varphi}{\sin z} \sin t, \quad (9.19)$$

в которой φ — географическая широта местности, z — зенитное расстояние Солнца и t — его часовой угол.

При лунных затмениях (рис. 43) позиционный угол P измеряется при центре лунного диска и определяет положение лунного радиуса, направленного к центру земной тени (полутени), а следовательно, и положение точек касания с нею Луны. Он также отсчитывается к востоку (против вращения часовой

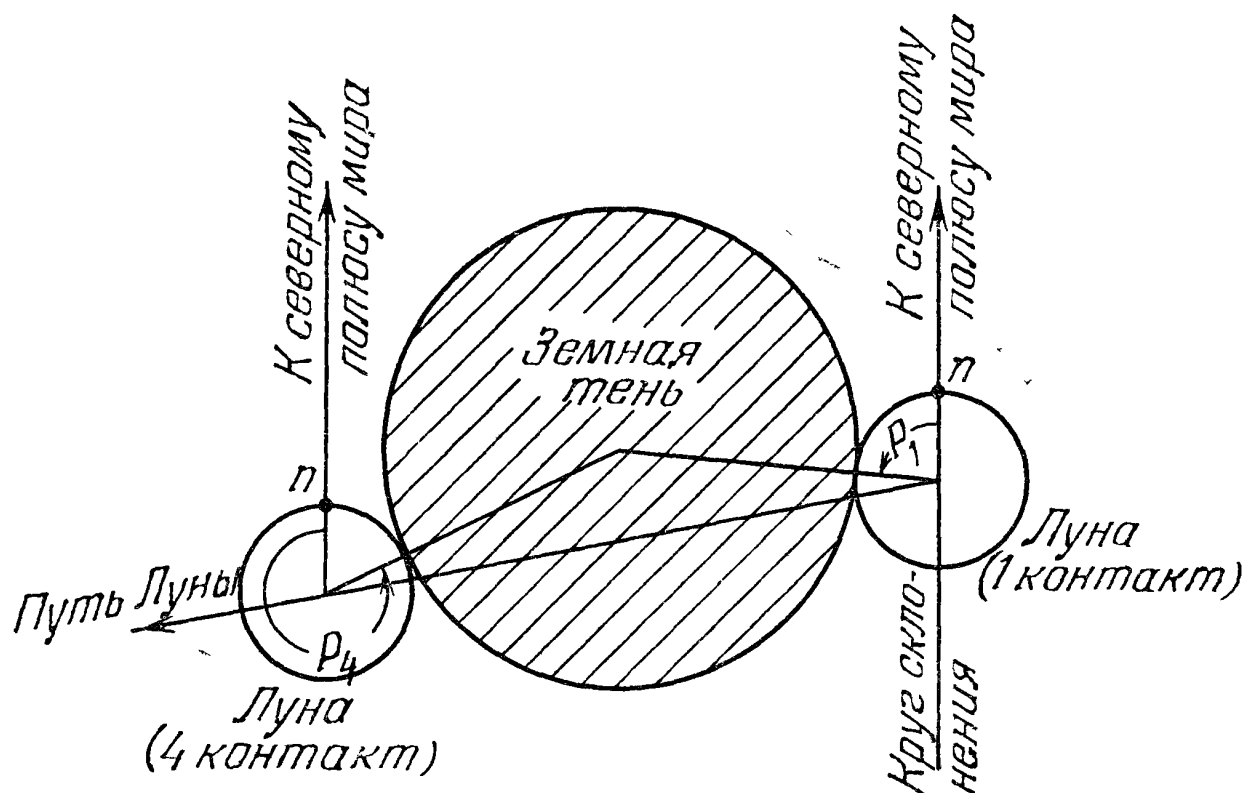


Рис. 43. Позиционные углы в начале и конце лунного затмения.

стрелки) от северной точки (n) лунного диска. В начале лунного затмения (первый, внешний контакт) позиционный угол $P_1 < 180^\circ$, а при окончании затмения (четвертый, внешний контакт) $P_4 > 180^\circ$. Углы положения от зенита Z (или P_z), как правило, не определяются, но если их нужно знать, то они легко вычисляются по формулам (9.18) и (9.19), где z — зенитное расстояние и t — часовой угол Луны.

Наконец, напомним, что солнечные затмения возможны лишь во время соединения Луны с Солнцем, а лунные затмения — во время противостояния этих светил. В астрономических ежегодниках сведения о соединениях и противостояниях Луны с Солнцем даются для наблюдателя, находящегося в центре Земли*), и поэтому оба эти явления именуются гео-

*) Или для наблюдателя, видящего эти явления в зените.

центрическими. В момент геоцентрического соединения Луны ($\odot$) с Солнцем ($\odot$) прямое восхождение светил одинаково, т. е. $\alpha_{\odot} = \alpha_{\odot}$. В момент геоцентрического противостояния Луны и Солнца $\alpha_{\odot} = \alpha_{\odot} + 12^{\circ}$.

10. ВЫЧИСЛЕНИЯ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

Сведения о предстоящих солнечных затмениях публикуются в астрономических ежегодниках на текущий год и, в частности, в выпускаемых издательством «Наука» «Астрономическом ежегоднике СССР» и «Астрономическом календаре-ежегоднике (переменной части)» ВАГО.

Во избежание ошибок при вычислениях следует иметь в виду, что в «Астрономическом ежегоднике СССР» сведения о затмениях приведены на различные моменты эфемеридного времени T_e , а в «Астрономическом календаре-ежегоднике» ВАГО — на аналогичные моменты всемирного времени T_0 . Связь между этими системами счета времени осуществляется через поправку

$$\Delta T_0 = T_e - T_0, \quad (10.1)$$

предварительное значение которой на текущий год публикуется в «Астрономическом ежегоднике СССР». В частности, в 1978 г.

$$\Delta T_0 = + 47^c = + 0^m,8,$$

а в 1979 г.

$$\Delta T_0 = + 49^c = + 0^m,8.$$

Прежде чем начинать вычисления обстоятельств солнечного затмения, необходимо убедиться в возможности его видимости в данной местности. Для этого по сведениям Астрономического ежегодника следует установить, в какое время суток произойдет затмение. В сведениях указан момент T_c геоцентрического соединения Луны с Солнцем либо по эфеме-

риднему T_e , либо по всемирному T_0 времени, но в предварительных подсчетах это роли не играет, так как различие в одноименных моментах меньше 1^m (минуты времени).

Тогда, по времени данной местности, геоцентрическое соединение Луны с Солнцем произойдет в момент

$$T'_c = T_c + 3^h + (T - T_m),$$

где $(T - T_m)$ — разность между временем этой местности и московским временем.

Если момент T'_c приходится на дневное время суток, то солнечное затмение в данной местности произойдет и можно вычислить его обстоятельства. При T'_c , приходящемся на ночное время, вычисление обстоятельств не имеет смысла.

Если же затмение приходится на утренние или вечерние часы, то следует предварительно убедиться в положении Солнца над горизонтом в момент T'_c геоцентрического соединения Луны с Солнцем. Для этого нужно подсчитать сугубо приближенное значение часового угла Солнца

$$t_\odot = T'_c - 15^h - (T - T_m) + \lambda,$$

где географическая долгота местности λ , как и все величины, входящие в эту формулу, берется с точностью, не превышающей 1^m .

Взяв из Астрономического ежегодника приближенное значение склонения Солнца $\delta_\odot$ в момент T_c геоцентрического соединения и зная географическую широту φ местности, вычисляют зенитное расстояние $z_\odot$ Солнца по формуле (9.3):

$$\cos z_\odot = \sin \varphi \cdot \sin \delta_\odot + \cos \varphi \cdot \cos \delta_\odot \cdot \cos t_\odot.$$

При $z_\odot < 90^\circ$ Солнце в середине затмения находится над горизонтом, и можно проводить вычисления. При $z_\odot > 90^\circ$ Солнце под горизонтом, и вычислять обстоятельств затмения не следует.

Ниже излагаются три метода вычисления местных обстоятельств солнечных затмений — аналитический, дифференциальный и полуграфический. Там, где это требуется, вычисления следует проводить на счетной машине или арифмометре, с использованием пятизначных таблиц тригонометрических функций, либо пользуясь шестизначными логарифмическими таблицами чисел и тригонометрических величин. Для отыскания тригонометрических функций по аргументу, выраженному в единицах времени, рекомендуются «Семизначные таблицы тригонометрических функций» проф. Л. С. Хренова («Наука», 1976). Значения же функций достаточно брать до пятого знака включительно. Весьма полезны и «Таблицы Барлоу» (изд-во «Мир», 1976), содержащие квадраты и кубы чисел до 15 000.

Аналитический метод. Ход солнечного затмения характеризуется рядом величин, называемых бесселевыми элементами затмения, которые позволяют вычислить условия видимости затмения в любой точке земной поверхности. Бесселевы элементы для каждого солнечного затмения публикуются в астрономических ежегодниках на текущий год, и поэтому методы их вычисления здесь не описаны, а показано лишь их использование для вычислений местных условий солнечных затмений. Интересующимся вычислениями самих бесселевых элементов и глобальных условий затмений, а также построением их карт, мы рекомендуем книгу А. А. Михайлова «Теория затмений» (Гостехиздат, 1954) и соответствующую статью в «Постоянной части Астрономического календаря» ВАГО (издание 5-е, Физматгиз, 1962).

Здесь мы будем придерживаться таких же обозначений бесселевых элементов, которые используются в «Астрономическом ежегоднике СССР» и в «Астрономическом календаре-ежегоднике» ВАГО.

Принятый в настоящее время аналитический метод вычислений солнечных затмений впервые разработан немецким астрономом Ф. Бесселем (1784—1846), а затем значительно усовершенствован рядом ученых, в том числе академиком А. А. Михайловым.

Сущность этого метода состоит в том, что по координатам центров Солнца и Луны, а также их радиу-

сам составляются уравнения круглых конических поверхностей, касательных к поверхностям этих светил (см. рис. 2). Коническая поверхность, образованная внешними касательными Fa и Hb , ограничивает в пространстве лунную тень. Коническая поверхность, образованная внутренними касательными FD и HE , дает пространственную границу лунной полутени.

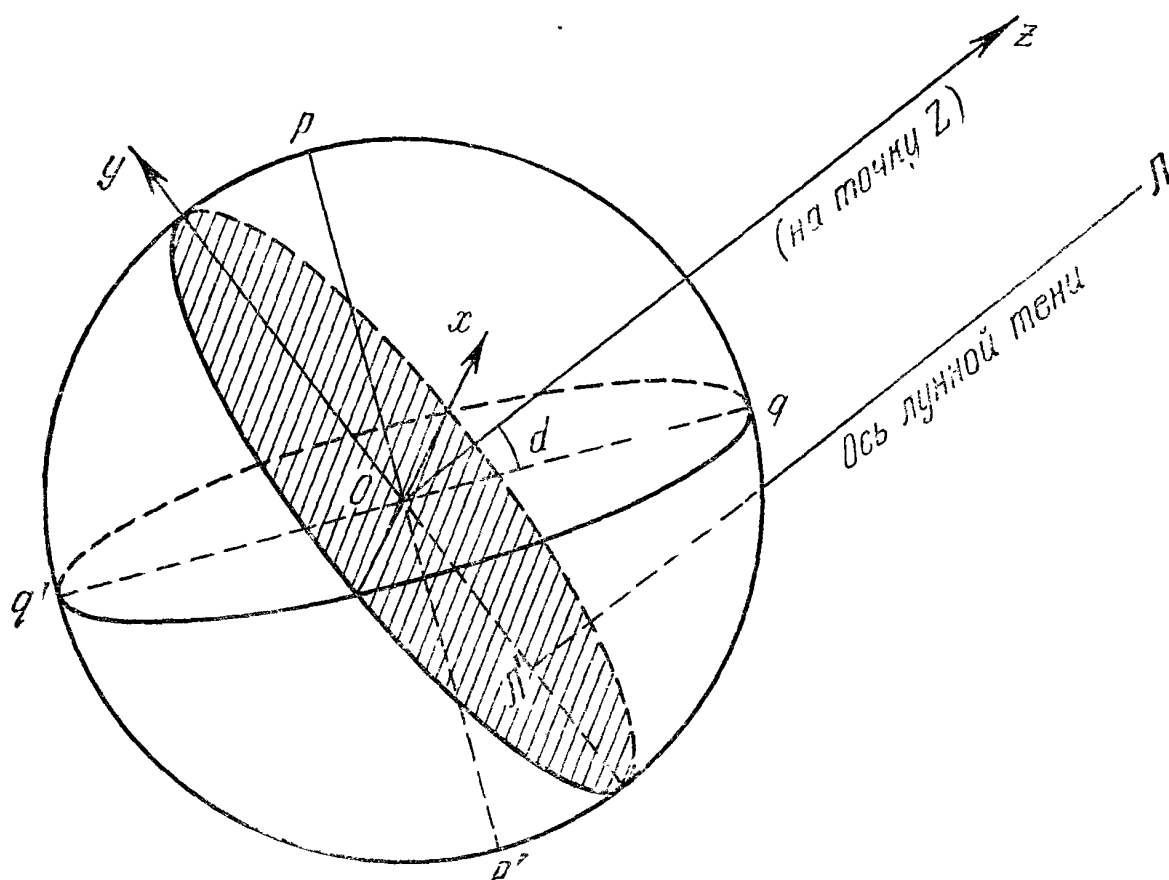


Рис. 44. Бесселева система прямоугольных координат: p — северный и p' — южный полюс Земли, qq' — земной экватор, d — склонение точки Z .

Решая уравнения этих конических поверхностей совместно с уравнением земной поверхности, принимаемой за сфероид, получают линии пересечения обоих конусов с земной поверхностью. Эти линии являются соответственно изохронами начала и конца полного и частного солнечного затмения на Земле.

Уравнения конических поверхностей лунной тени и полутени и уравнение земного сфероида имеют наиболее простой вид в особой прямоугольной геоцентрической системе координат, называемой бесселевой системой прямоугольных координат, началом которой является центр O Земли (рис. 44). Через этот же

центр O проходит основная плоскость xu координатной системы, всегда перпендикулярная к оси $ЛЛ'$ конуса лунной тени и полутени. По мере суточного движения Луны и Солнца основная плоскость системы координат все время поворачивается за ними по часовой стрелке. Линия пересечения основной плоскости с плоскостью земного экватора qq' служит осью x , положительным направлением которой считается направление в сторону движения лунной тени (в общем, к востоку). Ось y , перпендикулярная к оси x , лежит в основной плоскости, и ее положительным направлением считается направление в северное полушарие Земли (ее северный полюс обозначен буквой p). Ось z перпендикулярна к осям x и y , всегда параллельна оси конуса лунной тени (полутени) и направлена в сторону Луны. Ось z пересекается с небесной сферой в точке, называемой точкой Z^*).

Введем следующие обозначения в бесселевой системе координат:

- x, y, z — координаты центра Луны,
- x', y', z' — изменения координат центра Луны за одну минуту,
- ξ, η, ζ — текущие координаты точек конической поверхности лунной тени и полутени, а также точек земной поверхности,
- ξ', η', ζ' — изменения координат ξ, η, ζ за одну минуту,
- R — радиус Земли в произвольной точке ее поверхности (радиус-вектор точки земной поверхности), выраженный в экваториальных радиусах R_0 Земли,
- R_0 — экваториальный радиус Земли (6378 км), принимаемый в расчетах за единицу измерения всех линейных величин ($R_0 = 1$),
- f_e — угол между образующей конуса лунной полутени и его осью,
- f_i — угол между образующей конуса лунной тени и его осью,
- u_e — радиус сечения конуса лунной полутени основной координатной плоскостью xu ,
- u_i — радиус сечения конуса лунной тени основной координатной плоскостью xu ,
- l_e — радиус сечения конуса лунной полутени плоскостью математического горизонта места наблюдения,
- l_i — радиус сечения конуса лунной тени плоскостью математического горизонта места наблюдения.

*) Не путать с зенитом!

В экваториальной системе координат обозначим:

	Солнце	Луна	Точка Z
Геоцентрическое прямое восхождение	$\alpha_{\odot}$	α_{ζ}	a
Геоцентрическое склонение	$\delta_{\odot}$	δ_{ζ}	d
Изменение прямого восхождения за одну минуту	$\Delta\alpha_{\odot}$	$\Delta\alpha_{\zeta}$	—
Изменение склонения за одну минуту	$\Delta\delta_{\odot}$	$\Delta\delta_{\zeta}$	—
Геоцентрическое расстояние	$\rho_{\odot}$	ρ_{ζ}	—
Горизонтальный экваториальный параллакс	$p_{\odot}$	p_{ζ}	—
Угловой радиус	$r_{\odot}$	r_{ζ}	—
Часовой угол на начальном земном меридиане	—	—	μ
Изменение часового угла за одну минуту	—	—	μ'

При использовании в вычислениях всемирного времени за начальный земной меридиан принимается гринвичский географический меридиан. При использовании же эфемеридного времени за начальный принимается эфемеридный меридиан, расположенный к востоку от гринвичского.

Считая восточную долготу положительной (что значительно удобнее, так как в этом случае время возрастает с ростом долготы) и выражая географическую долготу λ и эфемеридную долготу λ_e в единицах времени, получим с достаточной степенью точности (до 1^c)

$$\lambda = \lambda_e + \Delta T_0, \quad (10.2)$$

где $\Delta T_0 = T_e - T_0$.

Для численно равных моментов всемирного и эфемеридного времени часовые углы μ точки Z на гринвичском и эфемеридном меридианах одинаковы.

Бесселевыми элементами затмения называются величины $x, y, x', y', d, u_e, u_i, \lg f_e, \lg f_i, \mu$ и μ' .

В астрономических ежегодниках публикуются следующие значения этих элементов $x, y, \sin d, \cos d, u_e, u_i$ и μ — через каждые 10 минут; x' и y' — на каждый целый час (ввиду малого их изменения); $\lg f_e, \lg f_i$ и μ' — одно значение для середины затмения, так как эти элементы в течение всего затмения практически остаются неизменными; величина μ' часто дается в

радианах ($1' = 0,000291$ радиана и $1'' = 0,000005$ радиана).

Не вдаваясь в подробности, покажем лишь принцип вычисления границ лунной тени и полутени на земной поверхности и определения вида солнечного затмения. Для любого момента времени уравнение конуса лунной тени (полутени) в бесселевой системе координат имеет вид

$$(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 = (u - \zeta \cdot \operatorname{tg} f)^2, \quad (10.3)$$

а уравнение земного сфероида

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = R^2. \quad (10.4)$$

Совместное решение уравнений (10.3) и (10.4) дает значение координат ξ , η и ζ точек земной поверхности, лежащих на границе лунной тени и полутени; по этим координатам находят географические координаты λ (долготу) и φ (широту) тех же точек. В местах земной поверхности с $\xi = 0$ затмение наблюдается в меридиане, а с $\zeta = 0$ — в горизонте.

Средние значения углов f_i и f_e и пределы их возможных изменений следующие:

$$f_i = 16'00'' \pm 18''; \quad f_e = 16'04'' \pm 18''.$$

Оба угла связаны между собой соотношениями $\operatorname{tg} f_i = 0,995019 \operatorname{tg} f_e$ и $\operatorname{tg} f_e = 1,005006 \operatorname{tg} f_i$.

Величина u_e радиуса сечения лунной полутени всегда положительна, так как конус полутени расходящийся. Значение же u_i радиуса сечения лунной тени может быть и положительным, и отрицательным, в зависимости от вида затмения. При $u_i < 0$ затмение полное; при $u_i > 0$ оно может быть кольцеобразным. Критерием служит радиус l_i сечения конуса лунной тени плоскостью истинного горизонта места наблюдения:

$$l_i = u_i - \zeta \operatorname{tg} f_i;$$

при $l_i < 0$ затмение в данном месте полное, а при $l_i > 0$ — затмение кольцеобразное.

Приближенное значение

$$u_e - u_i = 0,5464. \quad (10.5)$$

Часовой угол точки Z

$$\mu = S - a,$$

где S — звездное время на начальном меридиане в данный момент T по принятой системе счета времени.

Если кратчайшее расстояние g центра Земли от оси конуса лунной тени положительно ($g > 0$), то ось конуса проходит севернее центра Земли; при $g < 0$ ось конуса тени проходит южнее центра Земли.

Радиус-вектор R точек земной поверхности (т. е. их расстояние от центра Земли), в которых возможно касание лунной полутени, заключен в узких пределах $0,9972 \leq R \leq 0,9977$, где уже учтена атмосферная рефракция.

При абсолютном значении $|g| < R - u_e$ лунная полутень полностью вступает на Землю, т. е. обе ее границы, определяющие движение полутени, проходят по земной поверхности (затмение первого типа). При $|g| > R - u_e$ полутень только частично падает на земную поверхность и затмение имеет лишь одну границу, а вторая граница отсутствует; ее принято считать мнимой (затмение второго типа), причем при $g > 0$ отсутствует северная граница, а при $g < 0$ отсутствует южная граница затмения.

Теперь покажем, каким образом, пользуясь бесселевыми элементами солнечного затмения, можно вычислить его обстоятельства в любом месте земной поверхности. Задача сводится к тому, чтобы для определенной местности вычислить моменты начала, середины и окончания затмения, его продолжительность, момент и величину наибольшей фазы, а также положение на солнечном диске точек касания с ним лунного диска в начале и конце затмения (контакты затмения). Для этого, помимо бесселевых элементов, необходимо знать географические координаты (географическую долготу λ и географическую широту φ) местности, а также ее радиус-вектор R , т. е. расстояние от центра Земли, выраженное в долях экваториального радиуса планеты. Величина радиуса-вектора R зависит от географической широты φ и заимствуется из табл. I (стр. 147).

Однако бесселевы координаты связаны не с географической широтой φ , а с геоцентрической широтой φ' , т. е. с углом, образуемым радиусом-вектором R с плоскостью земного экватора. Поэтому из той же табл. I для требуемой географической широты φ берется разность $(\varphi - \varphi')$ и тогда искомая

Значения $(\varphi - \varphi')$ и R

φ	$\varphi - \varphi'$	$\varphi - \varphi'$	R	φ	$\varphi - \varphi'$	$\varphi - \varphi'$	R
35°	10' 50"	10',83	0,99890	58°	10' 24"	10',40	0,99759
36	10 58	10,97	0,99885	59	10 13	10,22	0,99754
37	11 05	11,08	0,99879	60	10 01	10,02	0,99749
38	11 12	11,20	0,99874	61	9 48	9,80	0,99744
39	11 17	11,28	0,99868	62	9 35	9,58	0,99739
40	11 22	11,37	0,99862	63	9 22	9,37	0,99734
41	11 26	11,43	0,99856	64	9 07	9,12	0,99730
42	11 29	11,48	0,99851	65	8 52	8,87	0,99725
43	11 31	11,52	0,99845	66	8 36	8,60	0,99721
44	11 32	11,53	0,99839	67	8 19	8,32	0,99716
45	11 33	11,55	0,99833	68	8 11	8,18	0,99712
46	11 32	11,53	0,99827	69	7 45	7,75	0,99703
47	11 31	11,52	0,99821	70	7 26	7,43	0,99704
48	11 29	11,48	0,99816	71	7 08	7,13	0,99700
49	11 26	11,43	0,99810	72	6 48	6,80	0,99697
50	11 23	11,38	0,99804	73	6 28	6,47	0,99694
51	11 18	11,30	0,99798	74	6 08	6,13	0,99690
52	11 13	11,22	0,99792	75	5 47	5,78	0,99687
53	11 07	11,12	0,99787	76	5 26	5,43	0,99684
54	11 00	11,00	0,99781	77	5 05	5,08	0,99682
55	10 52	10,87	0,99776	78	4 43	4,72	0,96679
56	10 43	10,72	0,99770	79	4 20	4,33	0,99677
57	10 34	10,57	0,99765	80	3 58	3,97	0,99675

геоцентрическая широта
 $\varphi' = \varphi - (\varphi - \varphi')$.

Так как в табл. I сведения о $(\varphi - \varphi')$ и R приведены через 1° географической широты φ , то аналогичные сведения для промежуточных значений φ находятся линейной интерполяцией.

Если местность находится над уровнем моря на высоте $H \geq 0,7$ км, то для повышения точности вычислений рекомендуется заранее найти поправки

и

$$\left. \begin{aligned} \Delta H_s &= \frac{H}{6378} \sin \varphi \\ \Delta H_c &= \frac{H}{6378} \cos \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (10.6)$$

в которых $6378 \text{ км} = R_0$ есть экваториальный радиус Земли и поэтому H тоже выражено в километрах.

Дальнейшие вычисления проводятся отдельно для каждого искомого момента времени, т. е. для моментов начала T_1 и окончания T_4 частного затмения, начала T_2 и окончания T_3 полного или кольцеобразного затмения (если оно такое) и момента T_m его наибольшей фазы. Но пока еще сами эти моменты не известны и поэтому сначала приходится проводить предварительные вычисления, а затем уже — окончательные, иногда несколько раз. Выбор предварительных или исходных моментов T_u (этим символом обозначен предварительный момент любого искомого момента времени) осуществляется двумя способами. Первый способ, более длительный, состоит в том, что в опубликованной таблице бесселевых элементов выбирается момент времени T_u вблизи момента T_c геоцентрического соединения Луны с Солнцем и для него проводятся вычисления. Если вычисления покажут, что радиус l_e лунной полутени меньше расстояния m местности от оси конуса лунной тени, то либо в данной местности солнечного затмения вообще не произойдет, либо исходный момент T_u выбран неудачно, т. е. в этот момент затмения не будет, но в другие моменты времени оно возможно. Тогда необходимо выбрать иной исходный момент T_u : для западной местности — на 30—40 минут более ранний, а для восточной местности — на столько же более поздний, и снова повторить вычисления. При $l_e > m$ частное затмение происходит, и поэтому можно продолжать вычисления для моментов времени, расположенных в обе стороны от принятого исходного момента T_u .

Второй способ, более быстрый, позволяет выбрать исходный момент T_u по карте солнечного затмения, пусть даже весьма приближенной, которая, как правило, публикуется в астрономических ежегодниках наряду с бесселевыми элементами. На такой карте показаны изохроны начала и окончания частного затмения и по ним определяются ориентировочные моменты этих явлений в данной местности. Полученные или близкие к ним моменты времени принимаются за исходные T_u и для них из опубликованной таблицы заимствуются бесселевы элементы (при необходимости используется линейная интерполяция), с которыми раз-

дельно вычисляются моменты начала (T_1) и окончания (T_4) частного затмения.

Независимо от способа выбора исходных моментов приходится повторять вычисления и в конечном итоге находить такие моменты времени, для которых $l_e = m$ (начало и конец частного затмения) и $-l_i = m$ (начало и конец полной фазы затмения), или $l_i = m$ (начало и окончание кольцеобразной фазы).

Формулы, по которым проводятся вычисления, пригодны для любых моментов времени, в том числе и для исходных. Но нужно помнить, что при выражении моментов по всемирному времени в формулы подставляется географическая долгота λ , а если они выражены по эфемеридному времени, то подставляется эфемеридная долгота λ_e , определяемая из равенства (10.2). Значение же часового угла μ в обоих случаях остается одинаковым.

Прежде всего для исходного момента времени T_u вычисляется координата

$$\zeta = R \sin \varphi' \cdot \sin d + R \cos \varphi' \cdot \cos d \cdot \cos (\mu + \lambda).$$

Если окажется, что $\zeta < 0$, то дальнейшие вычисления для принятого момента времени не нужны, так как Солнце находится под горизонтом, и следует выбрать иной момент времени. При $\zeta < 0,13$ для получения точных результатов необходимо учитывать влияние рефракции путем введения поправки ΔR , заимствуемой из табл. II.

Т а б л и ц а II

Учет рефракции

ζ	ΔR	ζ	ΔR	ζ	ΔR
0,00	0,00028	0,04	0,00008	0,08	0,00004
0,01	20	0,05	7	0,09	3
0,02	15	0,06	5	0,10	2
0,03	11	0,07	4	0,12	2

В этом случае находится множитель

$$k = 1 + \frac{\Delta R}{R}$$

и затем, с учетом формулы (10.6), вычисляются коэффициенты

$$\text{и} \quad \left. \begin{aligned} A &= \kappa R \sin \varphi' + \Delta H_s \\ B &= \kappa R \cos \varphi' + \Delta H_c. \end{aligned} \right\} \quad (10.7)$$

В частном случае, при $\kappa = 1$ и $\Delta H_s = \Delta H_c = 0$, коэффициенты $A = R \sin \varphi'$ и $B = R \cos \varphi'$.

После этого для принятого исходного момента времени вычисляются координаты

$$\left. \begin{aligned} \xi &= B \sin (\mu + \lambda), \\ \eta &= A \cos d - B \sin d \cdot \cos (\mu + \lambda), \\ \zeta &= A \sin d + B \cos d \cdot \cos (\mu + \lambda), \end{aligned} \right\} \quad (10.8)$$

и их минутные изменения (с точностью до шестого десятичного знака)

$$\left. \begin{aligned} \xi' &= 0,004364 B \cos (\mu + \lambda), \\ \eta' &= 0,004364 \xi \cdot \sin d, \\ \zeta' &= -0,004364 \xi \cdot \cos d. \end{aligned} \right\} \quad (10.9)$$

Проверка вычисления осуществляется равенством

$$\sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2},$$

удовлетворяемом в четвертом десятичном знаке.

Радиус лунной полутени l_e на плоскости математического горизонта местности вычисляется по радиусу u_e полутени на основной плоскости бесселевых координат и по тангенсу угла f_e между осью и образующей конуса полутени, так как

$$l_e = u_e - \xi \operatorname{tg} f_e, \quad (10.10)$$

а радиус l_i лунной тени — по ее радиусу u_i и тангенсу угла f_i , т. е.

$$l_i = u_i - \xi \operatorname{tg} f_i. \quad (10.11)$$

Величины u_0 , $\operatorname{tg} f_e$, u_i и $\operatorname{tg} f_i$ берутся для принятого момента времени из таблицы бесселевых элементов затмения.

Расстояние m места наблюдения от оси конуса лунной тени (от центральной линии затмения) определяется по формуле

$$m = +\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}. \quad (10.12)$$

Для удобства дальнейших вычислений вводят величины M , N и n . Полагают

$$\left. \begin{aligned} x - \xi &= m \sin M, & x' - \xi' &= n \sin N, \\ y - \eta &= m \cos M, & y' - \eta' &= n \cos N, \end{aligned} \right\} \quad (10.13)$$

где $m > 0$ и $n > 0$ [m — величина из формулы (10.12)].

Далее вычисляют M , N и n по формулам

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} M &= \frac{x - \xi}{y - \eta}, & \operatorname{tg} N &= \frac{x' - \xi'}{y' - \eta'} \\ \text{и} & & n &= +\sqrt{(x' - \xi')^2 + (y' - \eta')^2}, \end{aligned} \right\} \quad (10.14)$$

причем для $(x' - \xi')^2$ и $(y' - \eta')^2$ сохраняется точность до восьмого десятичного знака.

Значения углов M и N выбираются в соответствии со знаками в формулах (10.13).

Позиционные углы P центра лунного диска в любые моменты частного солнечного затмения и, следовательно, позиционные углы P_1 и P_4 точек касания лунного и солнечного дисков определяются равенством

$$\sin(P - N) = \frac{m}{l_e} \sin(M - N), \quad (10.15)$$

причем квадрант для угла $(P - N)$ выбирается так, чтобы для начала затмения (P_1 — первый контакт) $l_e \cdot \cos(P_1 - N_1) > 0$, а для конца затмения (P_4 — последний или четвертый контакт) $l_e \cos(P_4 - N_4) > 0$.

Затем определяют

$$P = (P - N) + N. \quad (10.16)$$

В первом приближении моменты начала T_1 и окончания T_4 частного затмения отстоят от исходного

момента T_u на интервал времени

$$\Delta t = \frac{1}{n} [l_e \cos (P - N) - m \cos (M - N)], \quad (10.17)$$

выраженный в минутах.

Поэтому

$$\text{и} \quad \left. \begin{aligned} T_1 &= T_u - \Delta t \\ T_4 &= T_u + \Delta t. \end{aligned} \right\} \quad (10.18)$$

Округлив полученные по формуле (10.18) моменты до целой минуты и приняв их за новые исходные моменты, повторяют для них отдельно все вычисления по формулам (10.8) — (10.18). Обычно второго приближения бывает достаточно, но если все же Δt окажется близким к 10 минутам, то вторично найденные по формуле (10.18) моменты снова принимаются за исходные и все вычисления проводятся заново.

После окончательного определения моментов T_1 и T_4 находят момент середины затмения

$$T_r = \frac{T_1 + T_4}{2} \quad (10.19)$$

и, принимая этот момент за исходный, вычисляют по формулам (10.8) — (10.18) моменты начала T_2 и конца T_3 полной или кольцеобразной фазы, а также соответствующие им позиционные углы P_2 и P_3 , для чего в формулы (10.15) и (10.17) вместо l_e подставляется значение l_i . Для второго контакта $l_i \cos (P_2 - N_2) < 0$, а для третьего контакта $l_i \cos (P_3 - N_3) > 0$.

Обычно бывает достаточно одного вычисления.

Момент T_m наибольшей фазы затмения несколько отличается от момента T_r его середины и вычисляется из равенства

$$T_m = T_u - \frac{m}{n} \cos (M - N), \quad (10.20)$$

в котором все величины правой части принадлежат исходному моменту T_u , либо равному T_r либо близкому к нему моменту, выбираемому из таблицы беселевых элементов.

В момент T_m наибольшей фазы затмения

$$(M - N) = \mp 90^\circ \quad \text{и} \quad \cos(M - N) = 0. \quad (10.21)$$

Продолжительность солнечного затмения

$$\tau = T_4 - T_1,$$

а продолжительность его полной или кольцеобразной фазы

$$\tau_m = T_3 - T_2 = 2 \left| \frac{l_i}{n} \cos(P - N) \right|. \quad (10.22)$$

Если исходные моменты начала и окончания затмения определены по карте солнечного затмения, то вычисление его обстоятельств несколько облегчается. В этом случае в интервале в несколько минут по обе стороны от каждого из двух исходных моментов выбирают по 2—3 момента времени, для них линейной интерполяцией табличных данных находят бесселевы элементы и по формулам (10.8) — (10.14) вычисляют величины l_e , m , M и N . Получится две серии вычисленных величин: первая — для начала затмения, и вторая — для его конца. В каждой серии обязательно будут значения $l_e > m$ и $l_e < m$, соответствующие различным моментам времени. Тогда по этим моментам времени линейной интерполяцией легко найти такие моменты, в которые $l_e = m$, т. е. моменты начала T_1 и конца T_4 солнечного затмения, а для них (тоже линейной интерполяцией) соответствующие им углы M_1 и M_4 , а следовательно, и позиционные углы P_1 и P_4 , так как согласно формуле (10.15) при $l_e = m$ позиционный угол

$$P = M. \quad (10.23)$$

Аналогично можно вычислить начало и конец полной и кольцеобразной фазы затмения, выбрав для этой цели несколько моментов времени, отстоящих на 3—4 минуты в обе стороны от середины затмения (T_r) и найдя по ним линейной интерполяцией такие моменты времени T_2 и T_3 , при которых $|l_i| = m$. Тогда в эти моменты позиционные углы P_2 и P_3 при кольцеобразной фазе определяются равенством

(10.23), поскольку $l_i > 0$, а при полной фазе — равенством

$$P = M \mp 180^\circ, \quad (10.24)$$

так как при полном затмении $l_i < 0$.

Сопоставляя между собой значения M и N , вычисленные в интервале времени $(T_4 - T_1)$ или $(T_3 - T_2)$, находят линейной интерполяцией такой момент времени, при котором удовлетворяется равенство (10.21). Этот момент и представляет собой момент T_m наибольшей фазы затмения.

Теперь, когда известны основные моменты хода солнечного затмения, можно по формулам (10.8) — (10.16) проводить такие же вычисления для любых промежуточных моментов затмения, используя при этом бесселевы элементы, соответствующие выбранным моментам времени.

Если для точек касания лунного и солнечного дисков требуется определить их углы положения P_z от зенита, то $P_z = P = \gamma$, причем

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\xi}{\eta}.$$

Линейная фаза затмения Φ для любого момента времени, в том числе и наибольшая линейная фаза Φ_m частного затмения, вычисляется по формуле

$$\Phi = \frac{l_e - m \sin(M - N)}{l_e + l_i}. \quad (10.25)$$

Поскольку $l_e + l_i = 2l_e - (l_e - l_i)$, а различие между f_e и f_i не превышает $4''$, можно принять по формуле (10.5) $l_e - l_i = u_e - u_i = 0,5464$ и тогда

$$\Phi = \frac{l_e - m \sin(M - N)}{2l_e - 0,5464}, \quad (10.26)$$

что позволяет обойтись без знания l_i , которое для частных затмений не вычисляется.

Наибольшая линейная фаза Φ_m полного солнечного затмения вычисляется из условия $M - N = \mp 90^\circ$, т. е. $|\sin(M - N)| = 1$.

Для пунктов наблюдений, расположенных к северу от центральной линии затмения, $M - V = -90^\circ$, а для

пунктов, лежащих к югу от той же линии, $M - N = +90^\circ$.

Тогда из формул (10.25) и (10.26) получаем

$$\Phi_m = \frac{l_e - m}{l_e - l_i}$$

или

$$\Phi_m = \frac{l_e - m}{2l_e - 0,5464}.$$

Если требуется найти угловое расстояние σ между центрами солнечного и лунного дисков в различные моменты затмения, то оно определяется как

$$\sigma = 2r_\odot \frac{m}{l_e + l_i},$$

где $r_\odot$ — угловой радиус солнечного диска.

При известном σ любая линейная фаза затмения вычисляется по формуле

$$\Phi = \frac{r_\odot + r_\odot - \sigma}{2r_\odot},$$

в которой $r_\odot$ — угловой радиус лунного диска.

Часто бывает необходимо знать открытую часть $k_\odot$ диаметра солнечного диска, а также поверхностную фазу затмения $\Phi_0 = \Sigma/\Sigma_\odot$, т. е. отношение площади Σ части солнечного диска, покрытой Луной, ко всей площади $\Sigma_\odot$ солнечного диска. Эти величины могут быть найдены по формулам

$$k_\odot = 2r_\odot (1 - \Phi) = 2r_\odot \frac{l_i + m}{l_e + l_i}$$

и

$$\Phi_0 = \frac{1}{\pi} (b^2 \psi_1 + \psi_2 - \nu), \quad (10.27)$$

причем $\pi = 3,14159$, $b = r_\odot/r_\odot$,

$$\nu = 2 \sqrt{\Phi (1 - \Phi) (b - \Phi) (b + 1 - \Phi)}, \quad (10.28)$$

а углы ψ_1 и ψ_2 выражаются в радианах и определяются формулами

$$\sin \psi_2 = \frac{\nu}{b + 1 - 2\Phi} \quad \text{и} \quad \sin \psi_1 = \frac{\sin \psi_2}{b}. \quad (10.29)$$

**Зависимость поверхностной фазы Φ_0
от линейной фазы Φ**

$\Phi \backslash b$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,90	0,03639	0,10110	0,18248	0,27581	0,37805
0,95	0,03688	0,10256	0,18538	0,28057	0,38490
1,00	0,03738	0,10409	0,18812	0,28476	0,39100
1,04	0,03776	0,10516	0,19012	0,28788	0,39543
1,07	0,03803	0,10593	0,19155	0,29008	0,39851

$\Phi \backslash b$	0,6	0,7	0,8	0,9
0,90	0,48681	0,59986	0,71402	0,81000
0,95	0,49635	0,61297	0,73292	0,85300
1,00	0,50462	0,62384	0,74707	0,87289
1,04	0,51051	0,63129	0,75610	0,88313
1,07	0,51455	0,63629	0,76193	0,88899

В таблице III приводятся фазы Φ_0 для некоторых значений b и Φ .

По окончании вычислений необходимо все найденные моменты выразить по принятому в данной местности времени

$$T = T_0 + 3^ч (T - T_m),$$

с учетом формулы (10.1).

Вычисление положения центральной линии затмения. Географические координаты λ и φ точек земной поверхности, находящихся на центральной линии затмения (т. е. в середине полосы полного или кольцеобразного затмения), могут быть определены из условия, что эти точки отстоят от данной линии на расстоянии $m = 0$, и тогда согласно формуле (10.12)

$$(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 = 0,$$

что возможно только при

$$\xi = x \quad \text{и} \quad \eta = y.$$

Следовательно, беря для определенного момента времени T бесселевы элементы $x, y, \sin d, \cos d$ и μ , полагают сначала $R = 1$, далее находят

$$\zeta = + \sqrt{R^2 - x^2 - y^2} \quad (10.30)$$

и затем

$$\left. \begin{aligned} \text{ctg } \mu_\lambda &= \frac{\zeta \cos d - y \sin d}{x} \\ \text{tg } \varphi' &= \frac{\sin \mu_\lambda}{x} (\zeta \sin d + y \cos d), \end{aligned} \right\} \quad (10.31)$$

где μ_λ — часовой угол точки Z на меридиане места наблюдения, т. е. искомого пункта.

Определив по таблицам тригонометрических функций значение φ' , находят R либо по табл. I, либо по формуле

$$R = 1 - 0,003369 \sin^2 \varphi'$$

и, подставляя R в формулу (10.30), уточняют координату ζ , после чего по формулам (10.31) снова вычисляют μ_λ и $\text{tg } \varphi'$, по которым уже получают λ и φ , поскольку

$$\lambda = \mu_\lambda - \mu \quad \text{и} \quad \text{tg } \varphi = 1,00675 \text{tg } \varphi'.$$

Вычисление обстоятельств затмения по дифференциальным поправкам. Обстоятельства затмения в каком-либо произвольном пункте F с географическими координатами λ, φ могут быть вычислены по известным обстоятельствам затмения близлежащего пункта F_1 с географическими координатами λ_1, φ_1 , что особенно удобно в экспедиционных условиях.

Пусть известны обстоятельства затмения в пункте $F_1(\lambda_1, \varphi_1)$, геоцентрические координаты которого суть R_1 и φ'_1 . Обозначим через T_1 момент начала затмения в пункте $F_1(\lambda_1, \varphi_1)$, и пусть для этого момента бесселевы координаты этого пункта будут ξ_1, η_1, ζ_1 , минутные изменения ξ'_1 и η'_1 , часовой угол точки Z в этом пункте μ_{λ_1} и бесселевы элементы $x, y, x', y', \sin d, \cos d, \mu$. Очевидно,

$$\mu_{\lambda_1} = \mu + \lambda_1.$$

Образуем разности:

$$a = x' - \xi_1', \quad b = y' - \eta_1',$$

$$X = x - \xi_1, \quad Y = y - \eta_1.$$

По этим разностям вычислим коэффициенты:

$$A = \frac{Y R_1 \cos \varphi_1' \cos d + Y R_1 \sin \varphi_1' \sin d \cos \mu_{\lambda_1} - X R_1 \sin \varphi_1' \sin \mu_{\lambda_1}}{aX + bY}$$

и

$$B = \frac{X R_1 \cos \varphi_1' \cos \mu_{\lambda_1} + Y R_1 \cos \varphi_1' \sin d \sin \mu_{\lambda_1}}{aX + bY}.$$

Найдем разности географических координат двух пунктов: $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_1$ и $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_1$, причем λ и λ_1 считаются в одну сторону — к востоку. Тогда поправка времени Δt на начало затмения в пункте $F(\lambda, \varphi)$ будет

$$\Delta t = A \cdot \Delta\varphi + B \cdot \Delta\lambda, \quad (10.32)$$

причем $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ выражены в радианах, а Δt — в часах среднего времени.

Поскольку удобнее $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ выражать в минутах или секундах дуги, а Δt — в минутах или секундах времени, необходимо в формулу (10.32) ввести переводной коэффициент w_0 , зависящий от принятых единиц измерения, согласно табл. IV.

Таблица IV

Переводной коэффициент w_0

Δt	$\Delta\lambda$ и $\Delta\varphi$ в минутах дуги (')	$\Delta\lambda$ и $\Delta\varphi$ в секундах дуги (")
В минутах времени	$w_0 = 0.017453$ $\lg w_0 = 8,241870 - 10$	$w_0 = 0,000291$ $\lg w_0 = 6,463893 - 10$
В секундах времени	$w_0 = 1,047196$ $\lg w_0 = 0,020013$	$w_0 = 0.017453$ $\lg w_0 = 8,241870 - 10$

Тогда

$$\Delta t = w_0 (A \Delta\varphi + B \Delta\lambda)$$

и момент начала затмения в пункте $F(\lambda, \varphi)$

$$T = T_1 + \Delta t.$$

Для определения позиционного угла P начала затмения в пункте $F(\lambda, \varphi)$ находят поправки Δ_x и Δ_y :

$$\Delta_x = w(R_1 \sin \varphi'_1 \sin \mu_{\lambda_1} \cdot \Delta\varphi - R_1 \cos \varphi'_1 \cos \mu_{\lambda_1} \cdot \Delta\lambda),$$

$$\Delta_y = -w(R_1 \cos \varphi'_1 \cos d \cdot \Delta\varphi + R_1 \sin \varphi'_1 \sin d \cos \mu_{\lambda_1} \cdot \Delta\varphi + R_1 \cos \varphi'_1 \sin d \sin \mu_{\lambda_1} \cdot \Delta\lambda).$$

Здесь w — коэффициент, зависящий от единиц измерения $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$; если $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ выражены в минутах дуги ('), то $w = 0,00029089$ и $\lg w = 6,463726 - 10$; если же $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ выражены в секундах дуги ("), то $w = 0,000004848$ и $\lg w = 4,685575 - 10$.

Тогда поправка ΔP к позиционному углу P_1 (в пункте λ_1, φ_1) будет

$$\Delta P = \frac{\cos^2 P_1}{Y^2} (Y\Delta_x - X\Delta_y),$$

откуда искомый позиционный угол

$$P = P_1 + \Delta P.$$

Взяв для пункта $F_1(\lambda_1, \varphi_1)$ значения $\xi_1, \eta_1, \zeta_1, \xi'_1, \eta'_1, \mu_{\lambda_1}, x, y, x', y', \sin d, \cos d, \mu$ на момент конца затмения (или на другие моменты, в частности, на момент наибольшей фазы), вычисляют по тем же формулам соответствующие моменты и позиционные углы в пункте $F(\lambda, \varphi)$. Таким образом, вычисления, по существу, сводятся к отысканию коэффициентов A и B на определенные моменты времени. Эти коэффициенты легко могут быть найдены, если по независимым вычислениям известны обстоятельства затмения еще в каких-либо двух пунктах: $F_2(\lambda_2, \varphi_2)$ и $F_3(\lambda_3, \varphi_3)$.

Беря на какой-нибудь момент затмения (например, на начало) разности во времени наступления этого момента для пунктов $F_1(\lambda_1, \varphi_1)$, $F_2(\lambda_2, \varphi_2)$ и $F_3(\lambda_3, \varphi_3)$, получим

$$\begin{aligned} \Delta t_- = T_{\lambda_2} - T_{\lambda_1} &= A(\varphi_2 - \varphi_1) + B(\lambda_2 - \lambda_1) = \\ &= A \cdot \Delta\varphi_2 + B \cdot \Delta\lambda_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta t_3 = T_{\lambda_3} - T_{\lambda_1} &= A(\varphi_3 - \varphi_1) + B(\lambda_3 - \lambda_1) = \\ &= A \cdot \Delta\varphi_3 + B \Delta\lambda_3, \end{aligned}$$

откуда, решая эти уравнения, находим A и B :

$$A = \frac{\Delta t_2 \cdot \Delta \lambda_3 - \Delta t_3 \cdot \Delta \lambda_2}{\Delta \varphi_2 \cdot \Delta \lambda_3 - \Delta \varphi_3 \cdot \Delta \lambda_2} \cdot \frac{1}{\omega_0},$$

$$B = \frac{\Delta t_2 \cdot \Delta \varphi_3 - \Delta t_3 \cdot \Delta \varphi_2}{\Delta \varphi_3 \cdot \Delta \lambda_2 - \Delta \varphi_2 \cdot \Delta \lambda_3} \cdot \frac{1}{\omega_0},$$

где ω_0 — коэффициент из табл. IV.

Наиболее точными вычисления будут в том случае, если они проведены относительно исходного пункта $F_1(\lambda_1, \varphi_1)$, находящегося на центральной линии затмения. Тогда точность вычислений сохраняет силу на расстояния до 1000 км в обе стороны от центральной линии затмения.

Для любого пункта U , находящегося в полосе полного (кольцеобразного) затмения, можно дифференциальным методом определить продолжительность τ_m полного (кольцеобразного) затмения и позиционные углы второго (P_2) и третьего (P_3) контактов, если известно расстояние m этого пункта от центральной линии затмения. К северу от этой линии m считается положительным ($m > 0$), а к югу — отрицательным ($m < 0$). Пусть ширина полосы полного солнечного затмения (полосы главной фазы) есть D , а некоторый пункт K лежит на центральной линии затмения в той ее точке, от которой измеряется расстояние m пункта U от этой линии (направление $m = KU$ перпендикулярно к центральной линии затмения). Пусть, далее, в пункте K продолжительность полной фазы равняется τ_0 , а угол между осью y и центральной линией затмения есть N (угол N получается в процессе вычисления обстоятельств затмения в пункте K). Тогда из условия $\sin \vartheta = \frac{2m}{D}$ определяется угол ϑ и затем

$$\tau_m = \tau_0 \cos \vartheta, \quad P_2 = N - \vartheta \quad \text{и} \quad P_3 = N + \vartheta \pm 180^\circ.$$

Угол ϑ лежит в пределах $0^\circ < \vartheta < 180^\circ$, причем знак $\sin \vartheta$ определяется знаком m . Потеря продолжительности $\Delta \tau$ полной фазы в пункте U , обусловленная его удаленностью от центральной линии затмения,

$$\Delta \tau = \frac{2m^2}{D^2} \tau_0.$$

Полуграфический метод вычислений обстоятельств солнечных затмений. В этом методе часть простых вычислений проводится аналитически, а более сложная часть — графическим построением, что, конечно, понижает точность результатов. Чтобы воспользоваться этим методом, необходимо также знать географические координаты λ (в единицах времени, с точностью до $0^m,1$) и φ (с точностью до $1'$) местности, для которой проводятся вычисления. Если при вычислениях используется эфемеридное время, то географическую долготу λ следует заменить эфемеридной долготой λ_e [см. формулу (10.2) на стр. 144]. Но лучше проводить расчеты в системе всемирного времени T_0 , что ниже и принято.

Из обстоятельств солнечного затмения, опубликованных в Астрономическом ежегоднике (или Астрономическом календаре), выписывают для момента T_c геоцентрического соединения Луны с Солнцем по прямому восхождению следующие сведения: для Солнца — прямое восхождение $\alpha_\odot$ и склонение $\delta_\odot$, их часовые изменения $\Delta\alpha_\odot$ и $\Delta\delta_\odot$, угловой радиус $r_\odot$; для Луны — прямое восхождение α_ζ и склонение δ_ζ , их часовые изменения $\Delta\alpha_\zeta$ и $\Delta\delta_\zeta$, угловой радиус r_ζ и горизонтальный экваториальный параллакс p_ζ . Если эти сведения в Астрономическом ежегоднике приведены не для момента T_c , а для какого-то иного момента времени, то необходимо перевычислить их на момент T_c , используя для этого их часовые изменения. Когда это сделано, можно приступать к вычислениям. Склонение следует вычислять с точностью до $0',1$, а прямое восхождение, часовой угол и моменты времени — с точностью не ниже $0^m,1$, а лучше — до 1^c . Округления следует провести в конце вычислений.

Сначала находят разности

$$(\Delta\alpha_\zeta - \Delta\alpha_\odot) \text{ и } (\delta_\zeta - \delta_\odot),$$

а также перемещение Луны относительно Солнца за 1 час (относительное часовое перемещение) по небесной параллели

$$\Delta\alpha'_\zeta = (\Delta\alpha_\zeta - \Delta\alpha_\odot) \cos \delta_\zeta$$

и по кругу склонения

$$\Delta\delta'_\zeta = \Delta\delta_\zeta - \Delta\delta_\odot.$$

Переведя $\Delta\alpha'_{\zeta}$ в минуты дуги (из расчета $1^m = 15'$ и $1^\circ = 15''$) и умножая $\Delta\alpha'_{\zeta}$ и $\Delta\delta'_{\zeta}$ на 2, получают разности экваториальных координат $\alpha_{\zeta}^{\odot}$ и $\delta_{\zeta}^{\odot}$ Луны и Солнца в моменты времени T_0 , отстоящие на 1^h и 2^h (всего четыре момента) в обе стороны от момента T_c :

$$\alpha_{\zeta}^{\odot} = \Delta\alpha'_{\zeta} (T_0 - T_c) \quad (10.33)$$

и

$$\delta_{\zeta}^{\odot} = (\delta_{\zeta} - \delta_{\odot}) + \Delta\delta'_{\zeta} (T_0 - T_c), \quad (10.34)$$

где $(T_0 - T_c)$ соответственно равны -1^h и -2^h (до момента T_c), а также $+1^h$ и $+2^h$ (после момента T_c).

Далее следует выбрать масштаб для графических построений. Безусловно, чем крупнее масштаб, тем точнее будут результаты, и поэтому весьма желателен масштаб $1' = 4 \text{ мм}$ ($1^\circ = 240 \text{ мм}$), при котором диски Солнца и Луны изображаются окружностями с диаметрами, близкими к 120 мм . Но если этот масштаб окажется неудобным, то следует уменьшить его на одну четверть и принять $1' = 3 \text{ мм}$ ($1^\circ = 180 \text{ мм}$). Все вычисленные величины откладывают на чертеже в выбранном масштабе.

Проведя на чертеже вертикальную прямую NS , изображающую круг склонения Солнца (рис. 45), отмечают на ней около буквы N стрелкой направление к северному полюсу мира и положения центра солнечного диска (D) и центра лунного диска (B) в момент времени T_c геоцентрического соединения обоих светил. В выбранном масштабе отрезок BD должен соответствовать вычисленной разности $(\delta_{\zeta} - \delta_{\odot})$ с точностью до $0',5$. Если в этот момент $\delta_{\zeta} > \delta_{\odot}$, то точка B откладывается выше точки D , как это показано на рис. 45; если же $\delta_{\zeta} < \delta_{\odot}$, то точка B откладывается вниз от точки D .

Через точку B проводят горизонтальную прямую $СВА$, представляющую небесную параллель, на которой находится центр Луны в момент ее геоцентрического соединения с Солнцем. Концы этой небесной параллели отмечают буквами в направлении к востоку (E) и к западу (W). Аналогичную параллель RDQ проводят и через точку D , вокруг которой опи-

сывают окружность радиусом $r_{\odot}$, изображающую солнечный диск.

На обоих параллелях CBA и RDQ откладывают в принятом масштабе в обе стороны от точек B и D , равные между собой отрезки BA , BC , DQ и DR , показывающие разность прямых восхождений Луны и Солнца за 2 часа до и после момента T_c , т. е. разность $\alpha_{\odot}^{\odot}$, вычисленную по формуле (10.33) при

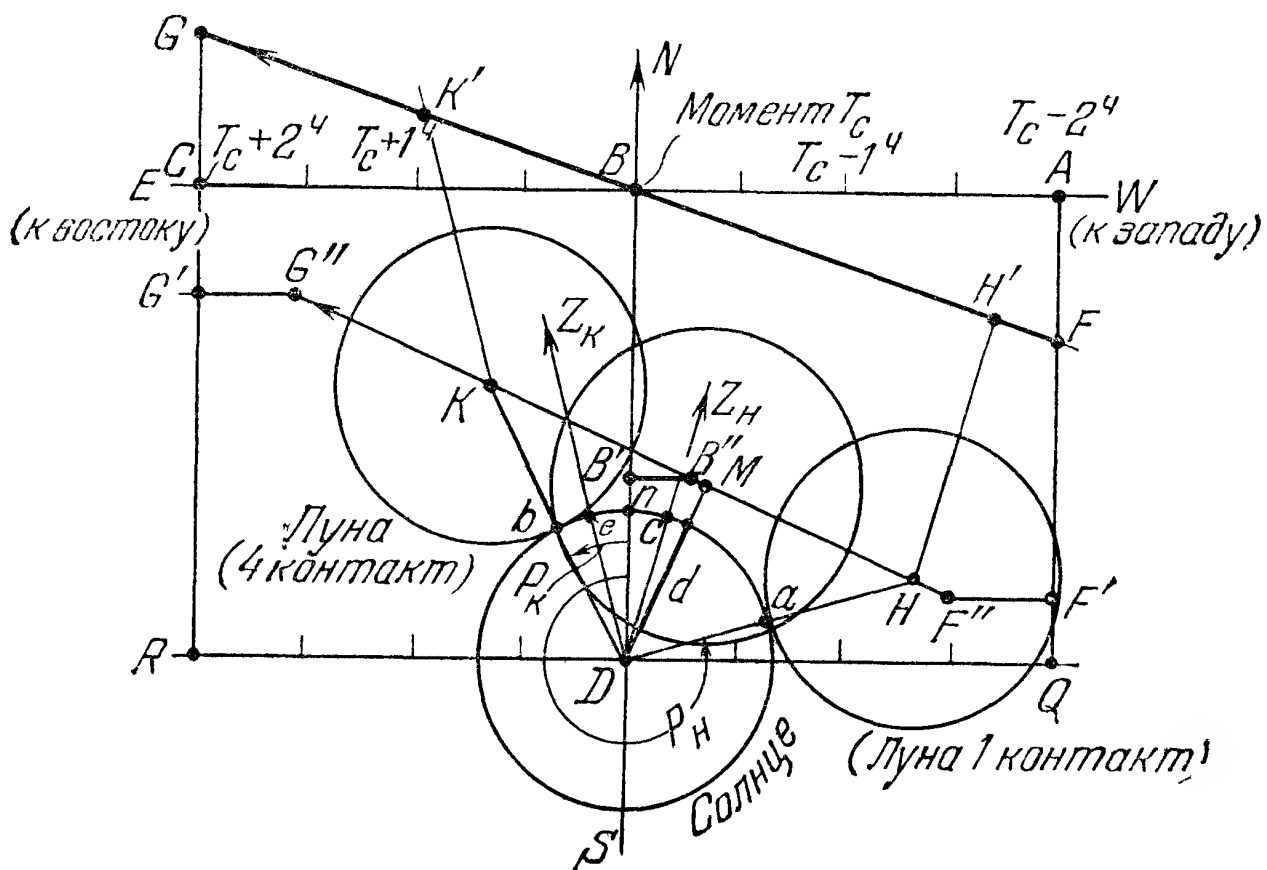


Рис. 45. Графическое построение обстоятельств солнечного затмения.

$(T_0 - T_c) = \mp 2$ часам. До момента T_c геоцентрического соединения значения $\alpha_{\odot}^{\odot}$ отрицательны и они откладываются вправо, к западу; после момента T_c значения $\alpha_{\odot}^{\odot}$ положительны и откладываются влево, к востоку. Каждый отрезок делят штрихами на две равных части, соответствующие $\alpha_{\odot}^{\odot}$ за 1 час. Можно, конечно, разделить эти отрезки и на большее число равных частей.

Точки A и Q , а также точки C и R , соединяют вертикальными линиями, изображающими круги склонения Луны при ее положении за 2 часа до момента T_c и через 2 часа после этого момента. По этим кругам склонения от параллели RQ откладывают в масштабе

дуги отрезки QF и RG , соответствующие $\delta_{\odot}$, вычисленным по формуле (10.34) при $(T_0 - T_c) = \mp 2^{\text{ч}}$. При $\delta_{\odot} > 0$ отрезки откладываются вверх от параллели RQ , а при $\delta_{\odot} < 0$ — вниз от нее. На рис. 45 оба отрезка QF и RG положительны. Точка F дает положение центра лунного диска за 2 часа до момента T_c , а точка G — через 2 часа после него. Прямая же FVG изображает геоцентрический путь Луны на небе, т. е. путь, усматриваемый из центра Земли. Построение этого пути можно сделать и по большему числу точек, например, через каждые полчаса.

Но с поверхности Земли лунный путь (называемый топоцентрическим) представляется несколько смещенным вследствие значительного параллакса Луны. Поэтому необходимо вычислить параллактическое смещение Луны по склонению (p_{δ}) и по прямому восхождению (p_{α}). С этой целью для всех пяти принятых моментов времени T_0 (в крайнем случае — для трех моментов), включая и момент T_c , находят склонение Луны

$$\delta = \delta_{\odot} + \Delta\delta_{\odot} (T_0 - T_c),$$

ее прямое восхождение

$$\alpha = \alpha_{\odot} + \Delta\alpha_{\odot} (T_0 - T_c)$$

и часовой угол

$$t = s_0 + \lambda - \alpha + 1,0027 T_0,$$

где s_0 — звездное время в среднюю гринвичскую полночь (в $0^{\text{ч}}$ всемирного времени) для даты затмения заимствуется из Астрономического ежегодника. При вычислении t необходимо момент T_0 выразить в часах в виде десятичной дроби, из расчета, что $1^{\text{м}} = 0^{\text{ч}},01667$, а затем произведение $1,0027 T_0$ снова перевести в часы и минуты, с точностью не ниже $0^{\text{м}},1$. Для этой же цели перевода T_0 в ΔS можно воспользоваться табл. 3 на стр. 202, но тогда коэффициент 1,0027 следует опустить.

Далее, по найденным величинам и по среднему значению радиуса-вектора R точек земной поверхности (в пределах территории СССР $R = 0,998$) вычисляют для всех принятых моментов времени

параллактическое смещение Луны по склонению

$$p_{\delta} = 0,998 p_{\zeta} (\sin \varphi \cos \delta - \cos \varphi \sin \delta \cos t)$$

и по прямому восхождению

$$p_{\alpha} = 0,998 p_{\zeta} \cos \varphi \sin t,$$

причем лунный параллакс p_{ζ} берется с точностью до $0',1$, аргументы под знаками функций — с точностью до $1'$, а величины p_{δ} и p_{α} округляются до $0',5$.

Так как на территории СССР параллактическое смещение p_{δ} всегда уменьшает склонение Луны, то его следует откладывать на чертеже (в принятом масштабе) всегда вниз от геоцентрического пути Луны FG . На рис. 45 значения p_{δ} показаны только для трех моментов времени: $-T_c$ (отрезок BB'), $T_c - 2^h$ (отрезок FF') и $T_c + 2^h$ (отрезок GG'). Аналогично откладываются и значения p_{δ} для промежуточных моментов времени. Через полученные точки B' , F' и G' проводят горизонтальные прямые (небесные параллели), вдоль которых от этих точек откладывают параллактическое смещение p_{α} для тех же моментов времени. Положительные значения p_{α} откладываются вправо, к западу (отрезки $B'B''$ и $G'G''$), а отрицательные — влево, к востоку (отрезок $F'F''$). Через найденные точки F'' , B'' и G'' проводится прямая (вследствие неточности построения она может выйти слегка ломаной), изображающая топоцентрический путь Луны.

Установив ножку циркуля в центр D солнечного диска, отмечают им на топоцентрическом лунном пути $F''B''G''$ две точки, H и K , отстоящие от точки D на расстояниях, равных $r_{\odot} + r_{\zeta}$. Эти точки H и K обозначают центр лунного диска в моменты его внешнего касания с солнечным диском, т. е. в моменты начала (первый контакт) и окончания (четвертый контакт) частных фаз затмения. Сами точки касания a и b легко находятся построением двух лунных дисков радиусом r_{ζ} , с центрами в точках H и K , а позиционные углы P_H и P_K этих точек (часто также обозначаемые P_1 и P_4) измеряются транспортиром при центре D солнечного диска, от его северной точки n , в направлении против вращения часовой стрелки (т. е. к востоку).

Аналогично на топоцентрическом лунном пути $F''B''G''$ циркулем отмечают две точки, расположенные от центра D солнечного диска на расстояниях $r_{\odot} - r_{\zeta}$ (если $r_{\zeta} < r_{\odot}$, то на расстояниях $r_{\odot} - r_{\zeta}$). Эти точки дадут положения центра лунного диска в моменты его внутреннего касания с солнечным диском, т.е. в моменты начала (второй контакт) и окончания (третий контакт) полного или кольцеобразного затмения (эти точки на рис. 45 не показаны, так как он иллюстрирует ход частного затмения). Позиционные углы P_2 и P_3 точек внутреннего касания дисков определяются точно так же, как и углы P_H и P_K точек внешнего касания.

Если требуется определить положения тех же точек касания по отношению к направлению на зенит (углы положения от зенита), обозначаемые P_z или Z (с индексом номера контакта), то следует найти на солнечном диске точки, обращенные к зениту в моменты его контактов с лунным диском. Для этого нужно отрезки BF и BG геоцентрического лунного пути поделить точками H' и K' в таком же отношении, в каком точки H и K соответственно делят отрезки $B''F'' = \Delta_1$ и $B''G'' = \Delta_2$. Обозначив $B''H = d_1$ и $B''K = d_2$, получим

$$\frac{BH'}{H'F} = \frac{B''H}{HF''} = \frac{d_1}{\Delta_1 - d_1} = n_1$$

и

$$\frac{BK'}{K'G} = \frac{B''K}{KG''} = \frac{d_2}{\Delta_2 - d_2} = n_2,$$

откуда отрезок

$$BH' = BF \frac{n_1}{n_1 + 1},$$

а отрезок

$$BK' = BG \frac{n_2}{n_2 + 1}.$$

Соединив точки H и K отдельно с точками H' и K' на геоцентрическом лунном пути прямыми линиями HH' и KK' , проводят из центра D солнечного диска параллельные им прямые DZ_H и DZ_K , которые в пересечении с солнечным диском дают его точки s и e , обращенные к зениту в моменты начала и окончания

частных фаз затмения. От этих прямых DZ_H и DZ_K легко по транспортиру отсчитать при центре D солнечного диска углы от зенита Z_1 и Z_4 точек a и b внешнего касания дисков обоих светил в те же моменты времени. Аналогично отыскиваются и углы от зенита Z_2 и Z_3 для точек внутреннего касания в моменты начала и окончания полного или кольцеобразного затмения.

Моменты затмения также находят графически. Так как каждый отрезок $F''B''$ и $B''G''$ своего топоцентрического пути Луна проходит за 2 часа = 120 минут, то отрезок $F''B'' = \Delta_1$, измеренный в миллиметрах, дает масштаб времени

$$m_1 = \frac{120}{\Delta_1} \left[\frac{\text{мин}}{\text{мм}} \right].$$

Измерив в миллиметрах отрезок $B''H = d_1$, получим интервал времени в минутах $\tau_1 = m_1 \cdot d_1$, отделяющий момент T_H (или T_1) начала затмения от момента T_c , откуда $T_H = T_c - \tau_1$.

Аналогично, отрезок $B''G'' = \Delta_2$, измеренный в миллиметрах, дает масштаб времени

$$m_2 = \frac{120}{\Delta_2} \left[\frac{\text{мин}}{\text{мм}} \right],$$

а отрезок $B''K = d_2$ (мм) определит интервал времени $\tau_2 = m_2 \cdot d_2$ в минутах, отделяющий момент T_K (или T_4) окончания затмения от момента T_c , и тогда получим $T_K = T_c + \tau_2$, а продолжительность затмения $\tau = T_K - T_H = \tau_1 + \tau_2$.

Подобным же образом определяются моменты начала и конца полного (кольцеобразного) затмения по положению центра лунного диска на топоцентрическом пути при внутреннем касании дисков обоих светил (второй и третий контакты). Используя масштабы времени, нетрудно показать положения центра лунного диска в любые моменты затмения.

Измеряя для различных моментов времени расстояния σ точек топоцентрического лунного пути $F''B''G''$ от центра D солнечного диска, находят в эти моменты линейную фазу затмения

$$\Phi = \frac{r_{\odot} + r_{\ominus} - \sigma}{2r_{\odot}}.$$

При частном солнечном затмении его линейная фаза также определяется как

$$\Phi = \frac{d}{2r_{\odot}},$$

где d — наибольшая часть диаметра солнечного диска, покрытая Луной.

В момент T_m наибольшей фазы Φ_m расстояние σ между центрами солнечного и лунного дисков наименьшее и определяется длиной перпендикуляра $DM = \sigma_m$, опущенного из центра D солнечного диска на топоцентрический путь Луны. Точка M показывает положение центра лунного диска в момент наибольшей фазы, а сам диск может быть показан окружностью радиусом $r_{\odot}$, проведенной из этой точки.

По окончании вычислений обстоятельств затмения все моменты времени T необходимо указать по времени данной местности, пользуясь соотношением

$$T = T_0 + Z^c + (T - T_m),$$

в котором T_0 — момент по всемирному времени и $(T - T_m)$ — разность во времени между местностью и Москвой.

Если вычисления проводились по эфемеридному времени T_e , то предварительно по формуле (10.1) нужно найти

$$T_0 = T_e - \Delta T_0.$$

11. ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЕ ЛУННЫХ ЗАТМЕНИЙ

Задача предвычислений лунных затмений состоит в определении моментов касания Луны с полутенью и тенью Земли (см. рис. 43 на стр. 138), момента и величины наибольшей фазы затмения, продолжительности затмения, позиционных углов точек касания и в определении положения границ видимости лунного затмения на Земле.

Вследствие наличия у Земли атмосферы контуры земной тени и полутени всегда несколько размыты. Хотя поперечное сечение теневого и полутеневого ко-

нусов должно иметь вид эллипсов (из-за сфероидальной формы Земли), однако с достаточной степенью точности оба конуса можно полагать круговыми. Размытость краев земной тени приводит к тому, что положение контура тени на лунном диске может быть определено с точностью, не превышающей $\pm 6''$, и эта размытость учитывается введением в размеры контуров тени и полутени поправочного коэффициента $k = 1,02$. Это же обстоятельство не позволяет вычислить ход лунных затмений с точностью, превышающей $\pm 0^m,2$, и поэтому можно пользоваться упрощенным методом вычисления.

Введем следующие обозначения:

	Солнце	Земная тень	Земная полутень	Луна
Геоцентрическое прямое восхождение	$\alpha_{\odot}$	α	α	α_{ζ}
Часовое изменение прямого восхождения	$\Delta\alpha_{\odot}$	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha_{\zeta}$
Геоцентрическое склонение	$\delta_{\odot}$	δ	δ	δ_{ζ}
Часовое изменение склонения	$\Delta\delta_{\odot}$	$\Delta\delta$	$\Delta\delta$	$\Delta\delta_{\zeta}$
Видимый угловой радиус	$r_{\odot}$	$r^*)$	R^*	r_{ζ}
Экваториальный горизонтальный параллакс	$p_{\odot}$	—	—	p_{ζ}

Поскольку центр контуров земной тени и полутени всегда лежит на эклиптике, в точке, диаметрально противоположной центру Солнца, то

$$\alpha = \alpha_{\odot} + 12^h = \alpha_{\odot} + 180^{\circ} \quad \text{и} \quad \delta = -\delta_{\odot}.$$

При вычислении r и R горизонтальный параллакс Луны p'_{ζ} относят не к экваториальному радиусу Земли, а к ее среднему радиусу, соответствующему географической широте $\varphi = 45^{\circ}$; поэтому $p'_{\zeta} = 0,99833p_{\zeta}$.

Радиусы земной тени и полутени определяются выражениями

$$\begin{aligned} r &= 1,02 \cdot (0,99833p_{\zeta} - r_{\odot} + p_{\odot}), \\ R &= 1,02 \cdot (0,99833p_{\zeta} + r_{\odot} + p_{\odot}). \end{aligned}$$

*) На расстоянии Луны от Земли.

Разность радиусов

$$R - r = 2,04 \cdot r_{\odot}.$$

Тогда в моменты начала и конца полутеневого затмения, т.е. в моменты внешнего касания Луны с земной полутенью, угловое расстояние σ между центрами земной тени и лунного диска будет

$$\sigma = R + r_{\zeta}.$$

В момент полного погружения Луны в земную полутень и в момент начала выхода Луны из нее происходит внутреннее касание Луны с полутенью и

$$\sigma = R - r_{\zeta}.$$

В моменты начала и конца частного теневого затмения, т.е. в моменты внешнего касания Луны с земной тенью (первый и четвертый контакты),

$$\sigma = r + r_{\zeta} \quad (\text{обозначено } \sigma_1 \text{ на рис. 32}).$$

В моменты начала и конца полного теневого затмения (второй и третий контакты) происходит внутреннее касание Луны с земной тенью, и тогда

$$\sigma = r - r_{\zeta} \quad (\text{см. рис. 32}).$$

Вычисление обстоятельств лунного затмения может быть проведено тремя способами: аналитическим, полуграфическим и графическим. Мы изложим здесь только два первых.

Аналитический метод. В любой момент времени экваториальные координаты центров земной тени и лунного диска связаны соотношениями (рис. 46):

$$\sin \sigma \cdot \sin Q = \cos \delta_{\zeta} \cdot \sin(\alpha_{\zeta} - \alpha), \quad (11.1)$$

$$\sin \sigma \cdot \cos Q = \sin \delta_{\zeta} \cdot \cos \delta - \sin \delta \cdot \cos \delta_{\zeta} \cdot \cos(\alpha_{\zeta} - \alpha), \quad (11.2)$$

$$\sin \sigma \cdot \sin P_1 = \cos \delta \cdot \sin(\alpha_{\zeta} - \alpha), \quad (11.3)$$

$$\sin \sigma \cdot \cos P_1 = \sin \delta \cdot \cos \delta_{\zeta} - \sin \delta_{\zeta} \cdot \cos \delta \cdot \cos(\alpha_{\zeta} - \alpha), \quad (11.4)$$

$$\sin Q \cdot \cos \delta = \sin P_1 \cdot \cos \delta_{\zeta}, \quad (11.5)$$

причем σ — угловое расстояние между центрами лунного диска и земной тени; Q — позиционный угол центра лунного диска при центре земной тени, отсчитываемый против часовой стрелки от направления к

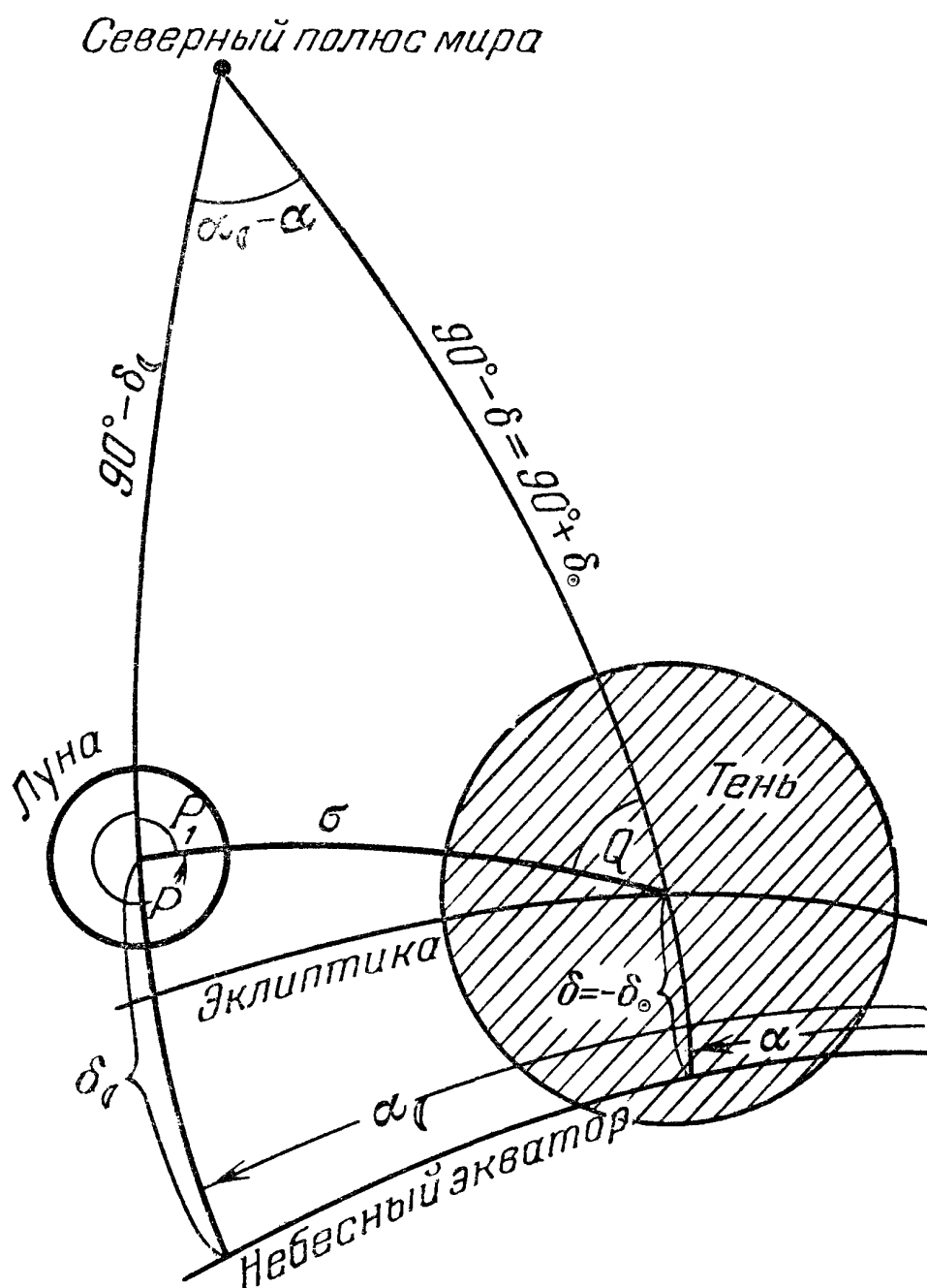


Рис. 46. Сферический треугольник, связывающий центры лунного диска и земной тени (вид из центра небесной сферы).

северному полюсу мира; $P_1 = 360^\circ - P$, где P — позиционный угол центра земной тени при центре лунного диска.

Обычно в формулах (11.1) — (11.5) заменяют δ на $-\delta_0$ и α на $\alpha_0 + 180^\circ$. Мы не рекомендуем делать второй замены, так как при вычислениях часто забывают об этом и вносят ошибку, равную 180° .

Поэтому, заменяя δ на $-\delta_{\odot}$ и P_1 на $360^\circ - P$, получим:

$$\sin \sigma \cdot \sin Q = \cos \delta_{\zeta} \cdot \sin(\alpha_{\zeta} - \alpha), \quad (11.6)$$

$$\sin \sigma \cdot \cos Q = \sin \delta_{\zeta} \cdot \cos \delta_{\odot} + \sin \delta_{\odot} \cdot \cos \delta_{\zeta} \cdot \cos(\alpha_{\zeta} - \alpha), \quad (11.7)$$

$$\sin \sigma \cdot \sin P = -\cos \delta_{\odot} \sin(\alpha_{\zeta} - \alpha), \quad (11.8)$$

$$\begin{aligned} \sin \sigma \cdot \cos P = & -\sin \delta_{\odot} \cdot \cos \delta_{\zeta} - \\ & - \sin \delta_{\zeta} \cdot \cos \delta_{\odot} \cdot \cos(\alpha_{\zeta} - \alpha), \end{aligned} \quad (11.9)$$

$$\sin Q \cdot \cos \delta_{\odot} = -\sin P \cdot \cos \delta_{\zeta}. \quad (11.10)$$

Момент середины затмения T_m (он же момент наибольшей линейной фазы Φ_m затмения) близок к моменту T_c геоцентрического противостояния Луны с Солнцем по прямому восхождению. Вследствие малых и почти пропорциональных времени изменений α_{ζ} , δ_{ζ} , α и δ в течение всего затмения, охватывающего интервал времени $\tau \approx T_c \mp 3^h$, вычисление всех обстоятельств затмения проводят относительно исходного момента T_u , близкого к T_c (или относительно самого T_c), и лишь при необходимости уточнения результатов находят второе приближение вычисленных моментов времени. Исходный момент T_u выбирается так, чтобы он содержал целое число десятков минут, что облегчает технику вычислений. Значения α , δ , α_{ζ} , δ_{ζ} , σ , P и линейной фазы затмения (теневого Φ и полутеневого θ) в течение всего хода затмения вычисляют на моменты времени, разделенные интервалами в 10 минут, и сводят в таблицу, называемую эфемеридой лунного затмения.

Прежде всего из сведений Астрономического ежегодника нужно заимствовать момент T_c геоцентрического противостояния Луны и Солнца. В этот момент

$$\alpha_{\zeta} = \alpha_{\odot} + 12^h \quad \text{или} \quad \alpha_{\zeta} = \alpha_{\odot} + 180^\circ.$$

По часовым изменениям $\Delta\alpha_{\zeta}$, $\Delta\delta_{\zeta}$, $\Delta\alpha_{\odot}$ и $\Delta\delta_{\odot}$ экваториальных координат Луны и Солнца находят α_{ζ} , δ_{ζ} , $\alpha_{\odot}$ и $\delta_{\odot}$, а следовательно, α и δ центра земной тени на моменты времени, отстоящие в обе стороны от T_u на 1^h , 2^h и 3^h .

Если буквами со штрихами (') обозначить экваториальные координаты на исходный момент T_u , то в любой другой момент времени T у Луны

$$\alpha_{\zeta} = \alpha'_{\zeta} + \Delta\alpha_{\zeta} (T - T_u)$$

и

$$\delta_{\zeta} = \delta'_{\zeta} + \Delta\delta_{\zeta} (T - T_u),$$

а у центра земной тени

$$\alpha = \alpha' + \Delta\alpha_{\odot} (T - T_u)$$

и

$$\delta = \delta' - \Delta\delta_{\odot} (T - T_u),$$

где $(T - T_u)$ выражено в часах, причем по желанию можно принять $T_u = T_c$.

В течение затмения σ , $(\alpha_{\zeta} - \alpha)$ и $(\delta_{\zeta} - \delta) = (\delta_{\zeta} + \delta_{\odot})$ являются сравнительно малыми величинами, и ими можно заменить синусы в формулах (11.6) — (11.9).

Обозначая правые части равенств (11.6) и (11.7) через x и y , получим для любого момента затмения:

$$\sigma \sin Q = x, \quad \sigma \cos Q = y \quad \text{и} \quad \sigma = +\sqrt{x^2 + y^2}. \quad (11.11)$$

Тогда

$$x = (\alpha_{\zeta} - \alpha) \cos \delta_{\zeta} \quad \text{и} \quad y = \delta_{\zeta} + \delta_{\odot} - \omega, \quad (11.12)$$

где ω — поправка на изменение $(\alpha_{\zeta} - \alpha)$:

$$\omega = 206\,265 \cdot \sin 2\delta_{\odot} \cdot \sin^2 \frac{\alpha_{\zeta} - \alpha}{2},$$

причем ω , x и y выражены в секундах дуги.

По значениям x и y на соседние моменты времени (разделенные интервалом в 1 час) находят их часовые изменения

$$x' = x_2 - x_1 \quad \text{и} \quad y' = y_2 - y_1,$$

где x_2 , y_2 и x_1 , y_1 суть величины, относящиеся соответственно к последующему и предыдущему моментам времени.

Часовые изменения x' и y' могут быть вычислены по приближенным, но вполне применимым в этом случае формулам:

$$x' = (\Delta\alpha_{\zeta} - \Delta\alpha_{\odot}) \cos \delta_{\zeta} \quad \text{и} \quad y' = \Delta\delta_{\zeta} + \Delta\delta_{\odot}, \quad (11.13)$$

причем вполне допустимо взять $\cos \delta_{\zeta}$ только лишь для момента T_u или, что еще лучше, для T_c .

Обозначая через x_0 , y_0 значения x и y для исходного момента T_u , можно считать, что для произвольного момента $T = T_u + \Delta t$ величины x и y определяются формулами

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + x' \Delta t, \\ y &= y_0 + y' \Delta t, \end{aligned} \right\} \quad (11.14)$$

где Δt выражено в долях часа.

Таким образом, задавая интервалы времени Δt , можно вычислить для любого момента T значения x и y и затем по формулам (11.11) определить σ и Q для этих моментов.

Для вычисления моментов и позиционных углов контактов края лунного диска с полутенью и тенью Земли можно воспользоваться следующим способом решения.

Введем вспомогательные величины $m > 0$, $n > 0$, M и N , связанные между собой соотношениями

$$\left. \begin{aligned} m \sin M &= x_0, & n \sin N &= x', \\ m \cos M &= y_0, & n \cos N &= y', \end{aligned} \right\} \quad (11.15)$$

откуда найдем

$$\left. \begin{aligned} m &= +\sqrt{x_0^2 + y_0^2}, & n &= +\sqrt{x'^2 + y'^2}, \\ \operatorname{tg} M &= \frac{x_0}{y_0}, & \operatorname{tg} N &= \frac{x'}{y'} \end{aligned} \right\} \quad (11.16)$$

и определим значения M и N в соответствии со знаками формул (11.15).

Далее, составим разность $(M - N)$ и по таблицам тригонометрических функций найдем $\sin (M - N)$ и $\cos (M - N)$.

Тогда величина позиционного угла Q центра лунного диска при центре земной тени определится из

соотношений

$$\sin(Q - N) = \frac{m}{\sigma} \sin(M - N) \text{ и } Q = (Q - N) + N. \quad (11.17)$$

Формулы (11.17) дают два значения $(Q - N)$ и Q , одно из которых соответствует началу, а другое — концу полутеневого или теневого затмения.

Для начала затмения

$$+90^\circ < (Q - N) < +270^\circ \text{ и } 180^\circ < Q < 360^\circ;$$

для конца затмения

$$-90^\circ < (Q - N) < +90^\circ \text{ и } 0^\circ < Q < 180^\circ.$$

Более удобно определять положение точек контактов не на контуре тени (или полутени), а на лунном диске. Это положение определяется позиционным углом P , отсчитываемым при центре лунного диска против вращения часовой стрелки от его северной точки, обращенной к северному полюсу мира (см. рис. 43). Позиционный угол P определяется из формулы (11.10) или, полагая с достаточной степенью точности, что $\cos \delta_\odot \approx \cos \delta_\zeta$, по более простой формуле

$$P = Q \pm 180^\circ.$$

Для начала затмения

$$0^\circ < P < 180^\circ,$$

для конца затмения

$$180^\circ < P < 360^\circ.$$

Момент наибольшей фазы

$$T_m = T_u + \Delta t_m, \quad (11.18)$$

где $\Delta t_m = -\frac{m}{n} \cos(M - N)$ выражено в долях часа, и $\Delta t_m = -60 \frac{m}{n} \cos(M - N)$ выражено в минутах времени.

Продолжительность затмения

$$\left. \begin{aligned} \tau &= 2 \frac{\sigma}{n} \cos(Q - N) && \text{выражена в часах} \\ \text{или} \\ \tau &= 120 \frac{\sigma}{n} \cos(Q - N) && \text{выражена в минутах.} \end{aligned} \right\} \quad (11.19)$$

В этих формулах σ и $\cos(Q - N)$ принадлежат одному и тому же моменту времени.

Моменты контактов, т. е. моменты начала и конца затмения (полного, частного, полутеневого), определяются из условия

$$T = T_u + \frac{\tau}{2} + \Delta t_m,$$

причем для начала $\tau < 0$, а для конца $\tau > 0$.

В зависимости от определения момента того или иного контакта в формулу (11.19) подставляются соответствующие им значения σ и $\cos(Q - N)$.

При вычислении моментов контактов полезна проверка их точности. Для этого по вычисленным моментам начала T_n и конца T_k одного вида затмения находят $T_m = \frac{T_n + T_k}{2}$ и сравнивают его с результатом, полученным по формуле (11.18). Точно так же $\tau = T_k - T_n$ должно совпасть с результатом формулы (11.19).

Вычисления обстоятельств затмения значительно упрощаются, если за исходный момент T_u принять момент T_c геоцентрического противостояния Луны с Солнцем. Так как в этот момент $\alpha_c = \alpha$, то в формулах (11.12), (11.13) и (11.14) $x_0 = 0$, $\omega = 0$, $y_0 = \delta_c + \delta_\odot$, $x = x' \Delta t$ и $y = (\delta_c + \delta_\odot) + y' \Delta t$. Тогда по формулам (11.15) и (11.16), $m = y_0 = \delta_c + \delta_\odot$ и $M = 0^\circ$ или 180° . Соответственно упрощаются и остальные выражения.

Для любого момента затмения его линейная фаза, выраженная в долях диаметра лунного диска, в том числе и наибольшая фаза, вычисляется по формулам:

$$\text{фаза полутеневого затмения } \theta = \frac{R + r_c - \sigma}{2r_c}$$

$$\text{и фаза теневого затмения } \Phi = \frac{r + r_c - \sigma}{2r_c},$$

причем σ определяется по формуле

$$\cos \sigma = \sin \delta \cdot \sin \delta_c + \cos \delta \cdot \cos \delta_c \cdot \cos(\alpha_c - \alpha)$$

или

$$\cos \sigma = -\sin \delta_\odot \sin \delta_c + \cos \delta_\odot \cos \delta_c \cdot \cos(\alpha_c - \alpha).$$

Позиционный угол P во время затмения может быть найден по формуле

$$\sin P = -\cos \delta \cdot \frac{\alpha_{\odot} - \alpha}{\sigma} = -\cos \delta_{\odot} \frac{\alpha_{\odot} - \alpha}{\sigma}. \quad (11.20)$$

После вычисления обстоятельств затмения можно получить второе приближение моментов контактов. Для этого нужно принять вычисленные моменты за исходные и повторить вычисления заново. Уточнение же величины позиционных углов P можно провести по формуле (11.20), подставляя в нее $(\alpha_{\odot} - \alpha)$, σ и $\cos \delta_{\odot}$ для соответствующих моментов времени (моментов контактов).

Лунное затмение видно на всем ночном полушарии Земли. Восточная граница видимости затмения проходит через те места земной поверхности, в которых затмение начинается при заходе Луны. Западной границей затмения является линия, на которой затмение заканчивается во время восхода Луны. Эти границы, называемые предельными линиями затмения, вычисляются обычно для начала и конца частного и полного затмения, а также для его наибольшей фазы.

Пусть T_0 есть момент по всемирному времени, в который наступает заданная фаза лунного затмения (начало, конец, наибольшая фаза). Тогда, вычислив на момент T_0 звездное время S_0 в Гринвиче и зная $\alpha_{\odot}$ в этот момент, найдем часовой угол t_0 Луны в Гринвиче

$$t_0 = S_0 - \alpha_{\odot}. \quad (11.21)$$

В местности восхода и захода Луны на географической широте φ в тот же момент часовой угол Луны будет $t_{\odot}$, который определяется из равенства (9.3)

$$\cos t_{\odot} = \frac{\cos z_{\odot} - \sin \varphi \cdot \sin \delta_{\odot}}{\cos \varphi \cdot \cos \delta_{\odot}}, \quad (11.22)$$

причем зенитное расстояние центра Луны

$$z_{\odot} = 89^{\circ}53',1 \quad (\text{см. стр. 124}),$$

$$\cos z_{\odot} = 0,00201 \quad \text{и} \quad \lg \cos z_{\odot} = 7,30320 - 10.$$

Зная на тот же момент $\delta_{\odot}$, задаются различными φ и по формуле (11.22) вычисляют для каждого φ два

значения t_{ζ} : для восхода $180^{\circ} < t_{\zeta} < 360^{\circ}$ и для захода $0^{\circ} < t_{\zeta} < 180^{\circ}$.

Географическая долгота λ мест, лежащих на предельных линиях, получится из равенства

$$\lambda = t_{\zeta} - t_0, \quad (11.23)$$

а географическая долгота $\lambda_{\text{в}}$ тех мест, где Луна в определенные моменты затмения находится в верхней кульминации (в меридиане), по формуле

$$\lambda_{\text{в}} = \alpha_{\zeta} - S_0, \quad (10.24)$$

где α_{ζ} — прямое восхождение Луны и S_0 — звездное время в Гринвиче в те же моменты затмения.

Отношение площади Σ той части лунного диска, которая покрыта земной тенью, к площади Σ_0 всего лунного диска называется поверхностной фазой затмения Φ_0 , и она, являясь функцией линейной фазы Φ , вычисляется по формулам (10.27) — (10.29), но только в них следует принимать для теневого затмения $b = \frac{r}{r_{\zeta}}$, а для полутеневого затмения $b = \frac{R}{r_{\zeta}}$.

В таблице V приведены поверхностные фазы Φ_0 для четырех значений b .

Т а б л и ц а V

Поверхностная фаза Φ_0

$\Phi \backslash b$	2,60	2,66	2,70	2,80
0,1	0,04487	0,04497	0,04509	0,04528
0,2	0,12447	0,12484	0,12506	0,12561
0,3	0,22404	0,22462	0,22496	0,22588
0,4	0,33717	0,33793	0,33840	0,33959
0,5	0,45944	0,46000	0,46059	0,46202
0,6	0,58556	0,58651	0,58717	0,58841
0,7	0,71218	0,71319	0,71347	0,71485
0,8	0,83217	0,83285	0,83332	0,83436
0,9	0,93635	0,93672	0,93696	0,93744
1,0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000

Полуграфический метод. Этот метод вычисления обстоятельств лунных затмений аналогичен подобному методу вычисления обстоятельств солнечных затмений

(см. стр. 161), с той только разницей, что вместо солнечного диска приходится графически изображать контуры земной тени и полутени, а параллакс Луны вообще не учитывать, поскольку геоцентрические расстояния Луны и земной тени (полутени) на лунной поверхности практически одинаковы. Поэтому этот метод будет здесь изложен весьма кратко.

Выпишем из Астрономического ежегодника на момент T_0 геоцентрического противостояния Луны с Солнцем следующие сведения: о Солнце — прямое восхождение $\alpha_\odot$ и его часовое изменение $\Delta\alpha_\odot$, склонение $\delta_\odot$ и его часовое изменение $\Delta\delta_\odot$, угловой радиус $r_\odot$ и горизонтальный экваториальный параллакс $p_\odot$; о Луне — те же величины, обозначаемые соответственно α_ζ , $\Delta\alpha_\zeta$, δ_ζ , $\Delta\delta_\zeta$, r_ζ и p_ζ . Если в Астрономическом ежегоднике имеются сведения о радиусе r земной тени и радиусе R земной полутени (они даются для геоцентрического расстояния Луны), то их тоже следует выписать, но тогда не нужны экваториальные параллаксы $p_\odot$ и p_ζ . При отсутствии таких сведений необходимо вычислить

$$r = 1,02 \cdot (0,998p_\zeta - r_\odot + p_\odot)$$

и

$$R = 1,02 \cdot (0,998p_\zeta + r_\odot + p_\odot).$$

Величины $\delta_\odot$, $\Delta\delta_\odot$, $r_\odot$, δ_ζ , $\Delta\delta_\zeta$, r_ζ , r и R (а при необходимости $p_\odot$ и p_ζ) выписываются с точностью до $1''$, причем $r_\odot$, r_ζ , r и R тут же переводятся в минуты дуги, с точностью до $0',1$. Значения $\alpha_\odot$, $\Delta\alpha_\odot$, α_ζ и $\Delta\alpha_\zeta$ выписываются с точностью до 1° .

Центр контуров земной тени и полутени всегда находится на эклиптике, в точке диаметрально противоположной центру солнечного диска, и подобно Солнцу перемещается к востоку с той же угловой скоростью. Поэтому у центра земной тени всегда

прямое восхождение $\alpha = \alpha_\odot + 12^h = \alpha_\odot + 180^\circ$,

часовое изменение $\Delta\alpha = \Delta\alpha_\odot$,

склонение $\delta = -\delta_\odot$,

и часовое изменение $\Delta\delta = -\Delta\delta_\odot$.

Следовательно,

$$\Delta\alpha_{\zeta} - \Delta\alpha = \Delta\alpha_{\zeta} - \Delta\alpha_{\odot},$$

$$\Delta\delta_{\zeta} - \Delta\delta = \Delta\delta_{\zeta} + \Delta\delta_{\odot},$$

и в момент T_c геоцентрического противостояния Луны с Солнцем, вблизи середины затмения, когда $\alpha_{\zeta} = \alpha_{\odot} + 12^{\circ}$, прямое восхождение центра тени $\alpha = \alpha_{\zeta}$, а $\delta_{\zeta} - \delta = \delta_{\zeta} + \delta_{\odot}$.

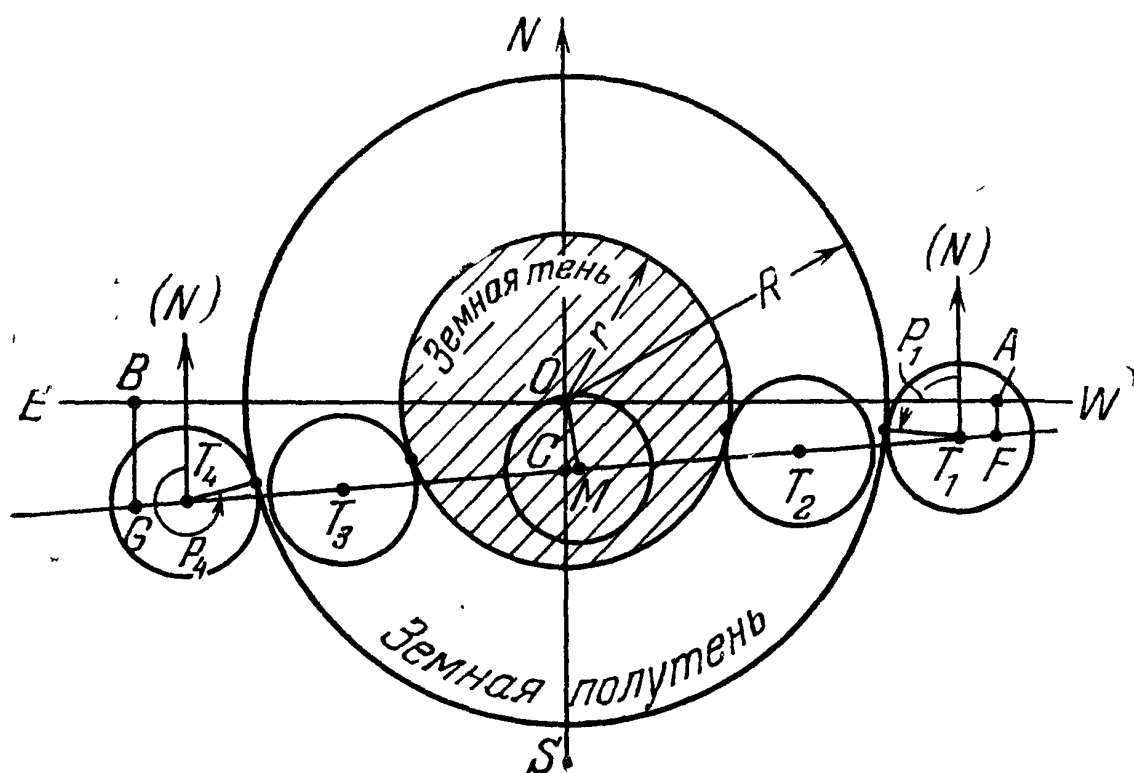


Рис. 47. Графическое построение обстоятельств лунного затмения.

На листе бумаги (рис. 47) проводят две взаимно перпендикулярных прямых, точка O пересечения которых изобразит центр контуров земной тени и полутени, прямая SON — круг склонения, а прямая EOW — небесную параллель этого центра в момент T_c ; направление ON — к северному полюсу мира, OE — к востоку и OW — к западу. Далее, выбирают масштаб для построения, например, $1' = 2 \text{ мм}$ (более крупный масштаб обеспечивает бóльшую точность), и путем умножения на него все вычисляемые величины переводят в миллиметры.

Прежде всего проводят из центра O две окружности — одну радиусом r (земную тень) и другую радиусом R (земную полутень). Затем вычисляют $(\delta_{\zeta} + \delta_{\odot})$, переводят в минуты дуги и откладывают по кругу склонения SON в виде отрезка OC . При

$(\delta_{\zeta} + \delta_{\odot}) > 0$ отрезок откладывается вверх от центра O , а при $(\delta_{\zeta} + \delta_{\odot}) < 0$ — вниз (как на рис. 47). Точка C изобразит центр лунного диска в момент T_c .

Вычислив изменения

$$\Delta\alpha'_{\zeta} = (\Delta\alpha_{\zeta} - \Delta\alpha_{\odot}) \cos \delta_{\zeta}$$

и

$$\Delta\delta'_{\zeta} = \Delta\delta_{\zeta} + \Delta\delta_{\odot},$$

переводят их в минуты дуги, умножают на 3 и тем самым получают изменения этих величин за 3 часа относительно момента T_c геоцентрического соединения.

Используя масштаб, откладывают по параллели EOW вправо (к западу) от точки O отрезок $OA = -3\Delta\alpha'_{\zeta}$, а влево (к востоку) от нее — отрезок $OB = +3\Delta\alpha'_{\zeta}$. Через полученные точки A и B проводят перпендикуляры и по ним откладывают отрезки $AF = (\delta_{\zeta} + \delta_{\odot}) - 3\Delta\delta'_{\zeta}$ и $BG = (\delta_{\zeta} + \delta_{\odot}) + 3\Delta\delta'_{\zeta}$. Положительные отрезки откладываются вверх от параллели EOW , а отрицательные — вниз от нее. Найденные точки F и G дают положения центра лунного диска за 3 часа до геоцентрического соединения и через 3 часа после него. Тогда прямая FCG даст путь Луны на небе на протяжении затмения и вблизи него.

Отрезки GC и CF делят на три равные части, каждая из которых соответствует интервалу времени в 1 час, и тем самым устанавливается масштаб времени

$$m = \frac{6 \cdot 60^m}{GF} = \frac{3 \cdot 60^m}{CF} \text{ [мин/мм]}.$$

Зная T_c и используя этот масштаб, находят интересующие моменты затмения. Так, отметив на прямой GF точки T_1 и T_4 , отстоящие от центра O на расстоянии $OT_1 = OT_4 = R + r_{\zeta}$ (это выполняется циркулем), получают положения T_1 и T_4 центра лунного диска в моменты его внешнего касания с земной полутенью (T_1 — начало и T_4 — конец полутеневого затмения). Окружности, радиусом r_{ζ} , проведенные из этих точек, покажут положения лунного диска и точек его внешнего касания с земной полутенью. Отрезки же CT_1 и CT_4 , переведенные по масштабу в интервалы времени

τ_1 и τ_4 , дадут моменты касаний $T_1 = T_c - \tau_1$ и $T_4 = T_c + \tau_4$, а продолжительность общего пребывания Луны в земной тени и полутени $\tau = T_4 - T_1 = \tau_1 + \tau_4$.

Если аналогичным образом на прямой GF отметить точки T_2 и T_3 , отстоящие от центра O земной тени на расстоянии $OT_2 = OT_3 = r + r_\zeta$, то получатся положения T_2 и T_3 центра лунного диска в моменты начала (T_2) и окончания (T_3) частного теневого затмения, а построение из этих точек лунного диска радиусом r_ζ покажет точки его внешнего касания с земной тенью. Отрезки же $CT_2 = \tau_2$ и $CT_3 = \tau_3$ дадут моменты этих явлений — момент начала частного затмения $T_2 = T_c - \tau_2$ и его окончания $T_3 = T_c + \tau_3$.

Тогда продолжительность теневого затмения

$$\tau_m = T_3 - T_2 = \tau_2 + \tau_3.$$

Точно так же находят положения лунного диска и моменты времени при внутреннем его касании с земной тенью и полутенью, на расстояниях его центра от точки O , равных $r - r_\zeta$ и $R - r_\zeta$, тем самым определяя продолжительность соответствующего вида затмения.

Измеряя расстояния различных точек лунного пути GF от центра O земной тени, получают угловые расстояния σ , по которым для тех же моментов вычисляется линейная фаза затмения:

$$\text{теневого } \Phi = \frac{r + r_\zeta - \sigma}{2r_\zeta}$$

$$\text{и полутеневого } \theta = \frac{R + r_\zeta - \sigma}{2r_\zeta} = \Phi + \frac{R - r}{2r_\zeta}.$$

Наибольшая линейная фаза затмения наступает при наименьшем значении σ_m , равном длине перпендикуляра OM , опущенного из центра O на лунный путь GF .

Впрочем, при частном затмении его линейная фаза Φ может быть также найдена как

$$\Phi = \frac{d}{d_\zeta} = \frac{d}{2r_\zeta},$$

где $d_{\zeta} = 2r_{\zeta}$ — диаметр лунного диска, а d — покрытая земной тенью часть лунного диаметра, направленного к центру земной тени.

Чтобы найти позиционный угол точки касания лунного диска с земной тенью (или полутенью), нужно через центр лунного диска провести вверх прямую, параллельную SON , и от нее при том же центре измерить транспортиром угол в направлении на точку касания. Позиционный угол отсчитывается против направления вращения часовой стрелки, т.е. к востоку.

Границы видимости затмения либо вычисляют по формулам (11.21) — (11.24), либо определяют по земному глобусу, для чего находят географические координаты λ_z и φ_z тех мест, в которых Луна в различные моменты T_0 затмения проходит в зените:

$$\lambda_z = \alpha'_{\zeta} - S_0 \quad \text{и} \quad \varphi_z = \delta'_{\zeta},$$

где $\alpha'_{\zeta} = \alpha_{\zeta} + \Delta\alpha_{\zeta}(T_0 - T_c)$ и $\delta'_{\zeta} = \delta_{\zeta} + \Delta\delta_{\zeta}(T_0 - T_c)$ суть экваториальные координаты Луны, а S_0 — звездное время в Гринвиче в те же моменты T_0 затмения.

Из найденных точек проводят окружности радиусом в 90° , которые являются соответствующими предельными линиями, и географические координаты их точек снимаются с глобуса.

После вычисления обстоятельств затмения по всемирному времени T_0 следует все найденные моменты перевести по формуле (9.16) в систему счета времени, принятую на данной территории (см. стр. 131—132).

12. БЛИЖАЙШИЕ СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

Безусловно, некоторых читателей заинтересует вопрос, когда в ближайшее время на территории СССР будут видны солнечные и лунные затмения. Ближайшее частное солнечное затмение 2 октября 1978 г.

будет видно в северных районах Белоруссии и Литвы, в Латвии и Эстонии, в северных и восточных районах Казахстана и Киргизии и почти на всей территории Российской Федерации, кроме ее южных и северо-восточных зон. Восточнее линии, проходящей примерно от Николаевска-на-Амуре вблизи Охотска и Усть-Неры к Ляховским островам, затмение будет проходить при заходе Солнца, а на Чукотском полуострове совсем не будет видно, так как там Солнце уже зайдет за горизонт. Наибольшая фаза затмения $\Phi_m = 0,69$ наступит в $9^{\text{ч}}28^{\text{м}}$ по московскому времени в акватории Восточно-Сибирского моря с географическими координатами $\lambda = 159^{\circ}37'$ и $\varphi = +72^{\circ}07'$. В Москве же $\Phi_m = 0,07$, в Ленинграде $\Phi_m = 0,14$, а в Верхоянске $\Phi_m = 0,66$.

Приближенные обстоятельства затмения в различных местностях могут быть выяснены по карте (см. рис. 48), на которой показаны изохроны по всемирному времени T_0 и изофазы затмения. Чтобы получить моменты затмения по времени определенной местности, необходимо к указанным моментам T_0 прибавить 3 часа и разность между принятым (местным) и московским временем. Обстоятельства этого затмения по московскому времени для некоторых населенных пунктов СССР, вычисленные Л. И. Румянцевой, приведены в табл. VI. Но желающим самостоятельно вычислить обстоятельства этого затмения для своего местожительства сообщаем подробные сведения по всемирному времени T_0 .

Геоцентрическое соединение Луны с Солнцем по прямому восхождению произойдет 2 октября 1978 г. в $T_c = 5^{\text{ч}}46^{\text{м}}03^{\text{с}}$ и для этого момента:

	Солнце ☉	Луна ☾
прямое восхождение α	$12^{\text{ч}} 31^{\text{м}} 53^{\text{с}},8$	$12^{\text{ч}} 31^{\text{м}} 53^{\text{с}},8$
часовое изменение $\Delta\alpha$	$+9^{\text{с}},06$	$+122^{\text{с}},69$
склонение δ	$-3^{\circ} 26' 35''$	$-2^{\circ} 18' 01''$
часовое изменение $\Delta\delta$	$-58'',2$	$-598'',6$
угловой радиус r	$15' 59''$	$15' 21''$
горизонтальный экваториальный параллакс p_0	$8'',79$	$56' 18'',52$

Для любого момента T_0 выраженного в часах и десятичных долях часа, экваториальные координаты

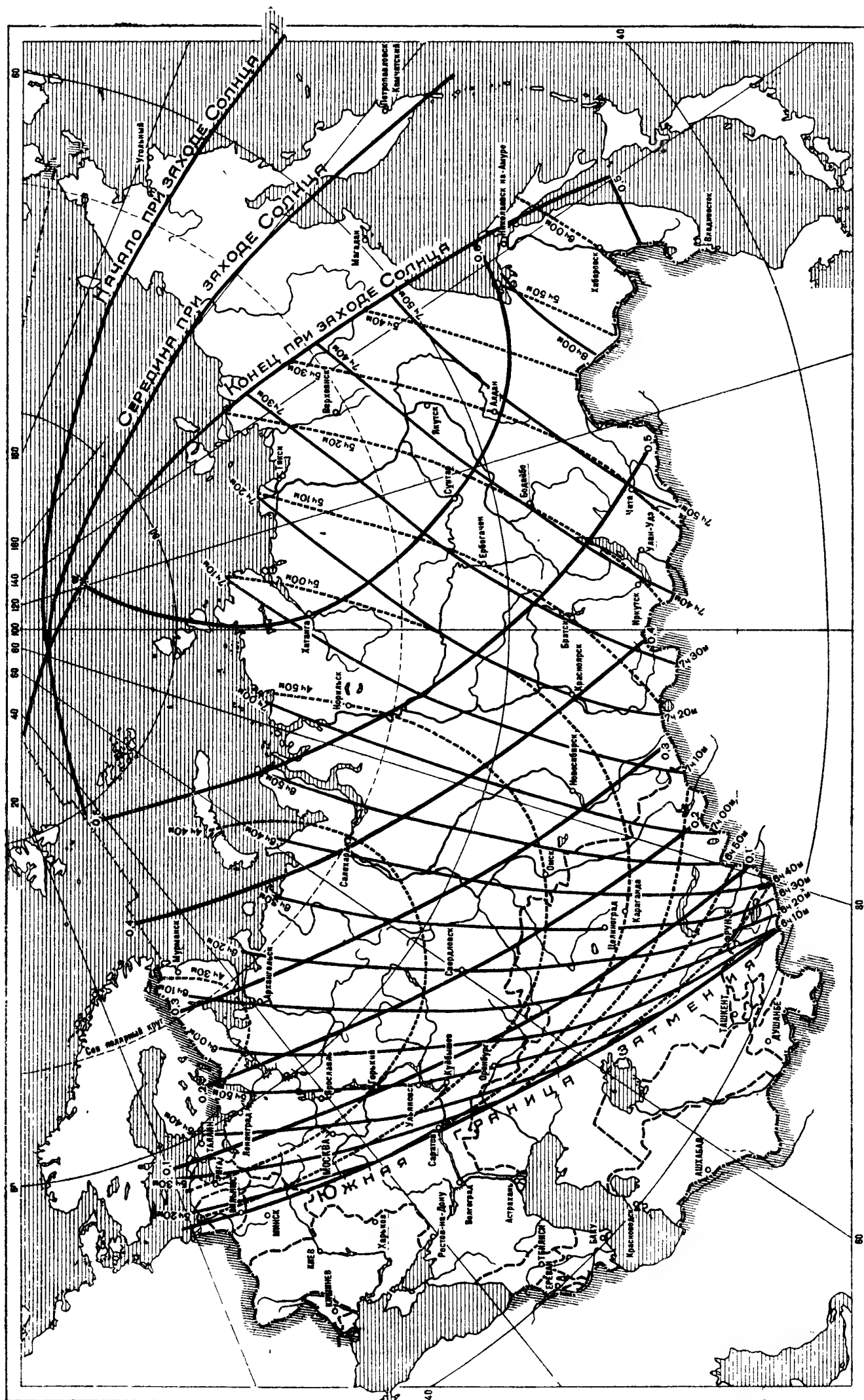


Рис. 48. Карта солнечного затмения 2 октября 1978 г.

**Обстоятельства солнечного затмения
2 октября 1978 г. по московскому времени**

Пункт	T_1	T_m	T_4	Φ_m	Z_1	Z_4
	ч м	ч м	ч м		°	°
Абакан	8 04	9 12	10 18	0,37	339	61
Алдан	8 30	9 41	10 48	0,60	297	59
Алма-Ата	8 26	8 58	9 30	0,06	27	52
Амдерма	7 38	8 38	9 39	0,43	340	84
Архангельск	7 32	8 20	9 10	0,27	0	84
Аян	8 45	9 53	10 57	0,62	287	53
Байкит	8 00	9 10	10 19	0,50	326	69
Барнаул	7 59	9 01	10 04	0,31	351	63
Благовещенск	8 49	9 59	11 03	0,53	294	45
Братск	8 11	9 22	10 31	0,47	324	60
Верхоянск	8 21	9 30	10 35	0,66	295	69
Владивосток	9 10	10 16	11 15	0,46	286	30
Вологда	7 37	8 13	8 50	0,14	20	78
Воркута	7 38	8 38	9 39	0,41	343	82
Говорово	8 13	9 21	10 27	0,66	301	73
Горно-Алтайск	8 02	9 05	10 08	0,30	351	61
Горький	7 40	8 14	8 48	0,11	25	75
Диксон	7 47	8 51	9 56	0,54	325	82
Енисейск	7 59	9 08	10 16	0,44	335	67
Жиганск	8 16	9 26	10 32	0,64	301	69
Иваново	7 39	8 12	8 47	0,11	24	76
Игарка	7 50	8 57	10 03	0,51	329	77
Ижевск	7 40	8 22	9 06	0,17	17	76
Илимск	8 12	9 24	10 33	0,49	319	60
Иркутск	8 19	9 31	10 39	0,44	323	54
Казань	7 41	8 17	8 55	0,12	23	75
Караганда	8 00	8 47	9 35	0,16	14	64
Кемерово	7 57	9 03	10 08	0,36	345	65
Киров	7 37	8 20	9 05	0,18	13	78
Кокчетав	7 51	8 40	9 31	0,19	10	68
Комсомольск-на-Амуре	8 57	10 04	11 06	0,56	285	44
Котлас	7 34	8 20	9 08	0,23	7	81
Красноярск	8 02	9 11	10 19	0,41	336	64
Курган	4 45	5 35	6 26	0,21	10	73
Кызыл	8 10	9 18	10 25	0,37	338	56
Кяхта	8 25	9 37	10 44	0,43	321	49

Пункт	T_1	T_m	T_4	Φ_m	Z_1	Z_4
	ч м	ч м	ч м		°	°
Ленинград	7 34	8 09	8 46	0,14	18	79
Москва	7 42	8 08	8 36	0,07	31	73
Мурманск	7 32	8 22	9 15	0,34	351	86
Нарьян-Мар	7 35	8 31	9 28	0,37	348	84
Нарым	7 50	8 55	10 00	0,38	345	70
Находка	7 45	8 49	9 54	0,47	334	79
Нижеангарск	8 19	9 32	10 41	0,51	316	57
Нижеудинск	8 10	9 20	10 29	0,44	330	60
Николаевск-на-Амуре	8 54	10 01	11 03	0,59	284	48
Новосибирск	7 55	8 59	10 02	0,33	351	65
Нордвик	8 02	9 09	10 14	0,63	309	77
Норильск	7 50	8 57	10 04	0,53	325	78
Оленек	8 06	9 16	10 23	0,62	309	73
Омск	7 50	8 45	9 43	0,26	3	69
Охотск	8 43	9 50	10 53	0,64	285	57
Павлодар	7 56	8 51	9 48	0,24	2	66
Пермь	7 39	8 26	9 14	0,21	11	77
Петрозаводск	7 32	8 14	8 56	0,20	11	81
Салехард	7 39	8 40	9 42	0,41	344	81
Свердловск	7 42	8 30	9 20	0,21	10	76
Семипалатинск	8 01	8 57	9 54	0,23	13	61
Серов	7 39	8 31	9 25	0,26	3	78
Сковородино	8 37	9 49	10 56	0,56	298	51
Сунтар	8 18	9 29	10 37	0,60	306	65
Сургут	7 44	8 45	9 47	0,36	349	76
Тайшет	8 07	9 18	10 27	0,45	330	61
Таллин	7 35	8 07	8 39	0,12	21	77
Тикси	8 13	9 21	10 26	0,66	300	74
Тобольск	7 43	8 39	9 36	0,28	360	75
Томск	7 55	9 00	10 06	0,36	345	67
Тура	8 01	9 11	10 20	0,54	320	71
Улан-Удэ	8 24	9 36	10 44	0,46	319	52
Хабаровск	9 00	10 07	11 09	0,53	285	40
Ханты-Мансийск	7 42	8 40	9 40	0,33	353	76
Хатанга	7 58	9 06	10 12	0,60	314	77
Целиноград	7 56	8 44	9 33	0,17	14	66
Чагда	8 35	9 45	10 50	0,62	293	58
Чита	8 30	9 42	10 50	0,50	311	50
Якутск	8 28	9 38	10 44	0,64	296	63
Ярославль	7 38	8 12	8 48	0,12	23	77

Бесселевы элементы солнечного затмения 2 октября 1978 г.

T_0	x	y	$\sin d$	$\cos d$	u_e	u_i	μ
4 ^ч 30 ^м	-0,64042	+1,42303	-0,05976	+0,99821	+0,55758	+0,01120	250° 06', 8
4 50	-0,47200	+1,36945	-0,05985	+0,99821	+0,55756	+0,01117	255 06,9
5 10	-0,30358	+1,31585	-0,05994	+0,99820	+0,55754	+0,01115	260 07,0
5 30	-0,13516	+1,26225	-0,06003	+0,99820	+0,55751	+0,01112	265 07,0
5 50	+0,03328	+1,20864	-0,06013	+0,99819	+0,55748	+0,01109	270 07,1
6 10	+0,20171	+1,15502	-0,06022	+0,99819	+0,55744	+0,01106	275 07,2
6 30	+0,37015	+1,10139	-0,06031	+0,99818	+0,55741	+0,01102	280 07,3
6 50	+0,53859	+1,04775	-0,06040	+0,99817	+0,55737	+0,01098	285 07,4
7 10	+0,70703	+0,99411	-0,06049	+0,99817	+0,55733	+0,01094	290 07,5
7 30	+0,87546	+0,94046	-0,06058	+0,99816	+0,55729	+0,01090	295 07,6
7 50	+1,04390	+0,88680	-0,06068	+0,99816	+0,55724	+0,01085	300 07,7
8 10	+1,21233	+0,83314	-0,06077	+0,99815	+0,55719	+0,01081	305 07,8
8 30	+1,38075	+0,77947	-0,06086	+0,99815	+0,55714	+0,01076	310 07,9

Изменения за одну минуту времени

T_0	x'	y'	T_0	x'	y'
4 ^ч	+0,008420	-0,002678	7 ^ч	+0,008422	-0,002682
5	+0,008421	-0,002680	8	+0,008421	-0,002683
6	+0,008422	-0,002681	9	+0,008420	-0,002684

$$\mu' = 0,0043646 \text{ радиана} = 15', 0044;$$

$$\operatorname{tg} i_e = 0,0046689,$$

$$\operatorname{tg} i_i = 0,0046457.$$

вычисляются по формулам:

$$\text{для Солнца } \alpha_{\odot} = 12^{\text{ч}} 31^{\text{м}} 56^{\text{с}},6 + 9^{\text{с}},06 (T_0 - 6^{\text{ч}}),$$

$$\delta_{\odot} = -3^{\circ} 26' 49'' - 58'',2 (T_0 - 6^{\text{ч}}),$$

$$\text{для Луны } \alpha_{\zeta} = 12^{\text{ч}} 32^{\text{м}} 23^{\text{с}},0 + 122^{\text{с}},69 (T_0 - 6^{\text{ч}}),$$

$$\delta_{\zeta} = -2^{\circ} 20' 26'' - 598'',6 (T_0 - 6^{\text{ч}}),$$

$$\rho_{\zeta} = 56' 18'',85 + 1'',34 (T_0 - 6^{\text{ч}}).$$

Звездное время в гринвичскую полночь 2 октября 1978 г. $s_0 = 0^{\text{ч}} 41^{\text{м}} 26^{\text{с}}$. Радиус-вектор точек земной поверхности можно принять $R = 0,998$.

Ближайшее полное солнечное затмение (являющееся повторением через сарос солнечного затмения 20 июля 1963 г., полоса полной фазы которого проходила по Аляске и Канаде) произойдет 31 июля 1981 г. и будет видно в полосе шириной около 110 км, проходящей от Очамчиры (Грузия, берег Черного моря) через Нальчик, Моздок, Эмбу, Тургай, Ленинск-Кузнецкий, Братск, Тындинский к Александровску-Сахалинскому. Севернее и южнее этой полосы затмение будет частным. Хотя обстоятельства частных фаз этого затмения полностью еще не вычислены, тем не менее предварительные расчеты для полосы полной фазы уже проведены горьковским астрономом В. С. Лазаревским и, с его любезного разрешения, публикуются в таблице VII, в которой моменты T_2 начала и T_3 конца полной фазы приведены по московскому времени, τ_m — продолжительность полной фазы, выраженная в секундах времени, Φ_m — наибольшая фаза, P_2 и P_3 — позиционные углы и Z_2 и Z_3 — углы положения от зенита для тех же моментов времени. Пункты расположены в направлении движения лунной тени, которая пройдет по земной поверхности в направлении с запада на восток, с небольшим отклонением к северу.

В день затмения Солнце будет находиться в созвездии Рака, состоящем из слабых звезд, и ни одна из них не будет видна даже во время полной фазы затмения. Зато примерно в 12° западнее (правее) Солнца хорошо будет виден Меркурий ($-0^{\text{м}},8$), распо-

Полоса полной фазы солнечного затмения
31 июля 1981 г.

Пункт	T_2	T_3	τ_m	Φ_m	P_2	P_3	Z_2	Z_3
	ч м	ч м	с		°	°	°	°
Очамчира	5 17,7	5 18,3	39	1,004	71,8	294,0	117,0	339,3
Гали	5 17,5	5 18,2	41	1,006	101,3	264,5	146,6	309,9
Нальчик	5 17,9	5 18,5	38	1,003	63,8	302,2	108,9	347,3
Моздок	5 17,8	5 18,6	45	1,006	88,7	277,2	134,0	322,6
Берчогур	5 22,5	5 23,3	46	1,003	53,8	313,4	97,4	357,0
Тургай	5 24,7	5 25,8	65	1,008	97,1	270,8	140,0	313,7
Амангельды	5 25,7	5 26,8	68	1,008	99,5	268,6	142,1	311,2
Славгород	5 35,9	5 37,0	68	1,010	90,2	275,8	129,0	314,7
Камень-на-Оби	5 38,4	5 39,9	87	1,010	97,1	274,1	134,7	311,7
Черепаново	5 40,5	5 41,9	85	1,008	113,7	258,1	150,3	294,7
Салаир	5 42,5	5 43,8	76	1,005	62,0	310,1	98,1	346,3
Гурьевск	5 42,6	5 43,9	80	1,006	66,7	305,4	102,8	341,5
Ленинск-Кузнецкий	5 43,2	5 44,7	88	1,008	112,0	260,3	147,6	295,8
Белово	5 43,0	5 44,5	87	1,008	77,3	294,9	113,1	330,7
Новоселово	5 47,9	5 49,5	94	1,009	82,8	290,6	116,4	324,1
Даурское	5 49,0	5 50,6	97	1,010	91,3	282,4	124,2	315,3
Ирбейское	5 52,8	5 54,4	98	1,010	105,3	269,4	136,2	300,3
Тайшет	5 55,7	5 57,4	100	1,009	114,6	261,2	143,1	289,7
Братск	6 00,0	6 01,6	99	1,008	75,6	300,3	102,0	336,7
Тындинский	6 30,2	6 32,0	107	1,007	75,2	309,1	79,1	313,0
Софийск	6 55,0	6 56,8	108	1,007	131,5	258,3	113,3	240,1
Мариинское	6 55,2	6 57,2	121	1,013	104,9	284,9	86,2	266,3
Александровск-Сахалинский	6 59,1	7 00,9	109	1,007	130,8	259,3	108,7	237,3

ложенный в созвездии Близнецов, а в 30° юго-восточнее (левее) Солнца — планета Венера ($-3^m,4$), находящаяся в созвездии Льва. Весьма вероятно, что на потемневшем небе проступят звезды α Льва ($+1^m,3$), α Малого Пса ($+0^m,5$), α Близнецов ($+1^m,6$), β Близнецов ($+1^m,2$) и планета Марс ($+1^m,8$), которую следует искать в 19° правее (западнее) Меркурия. В скобках, рядом с названиями светил, указан их блеск в звездных величинах (напомним, что чем ярче светило, тем меньше его звездная величина).

Взаимное расположение светил во время солнечного затмения показано на рис. 49.

Ближайшие лунные затмения, оба полные, будут видны 24 марта и 16 сентября 1978 г.

Во время затмения 24 марта 1978 г. Луна будет находиться в созвездии Девы, вблизи звезд η и γ ,

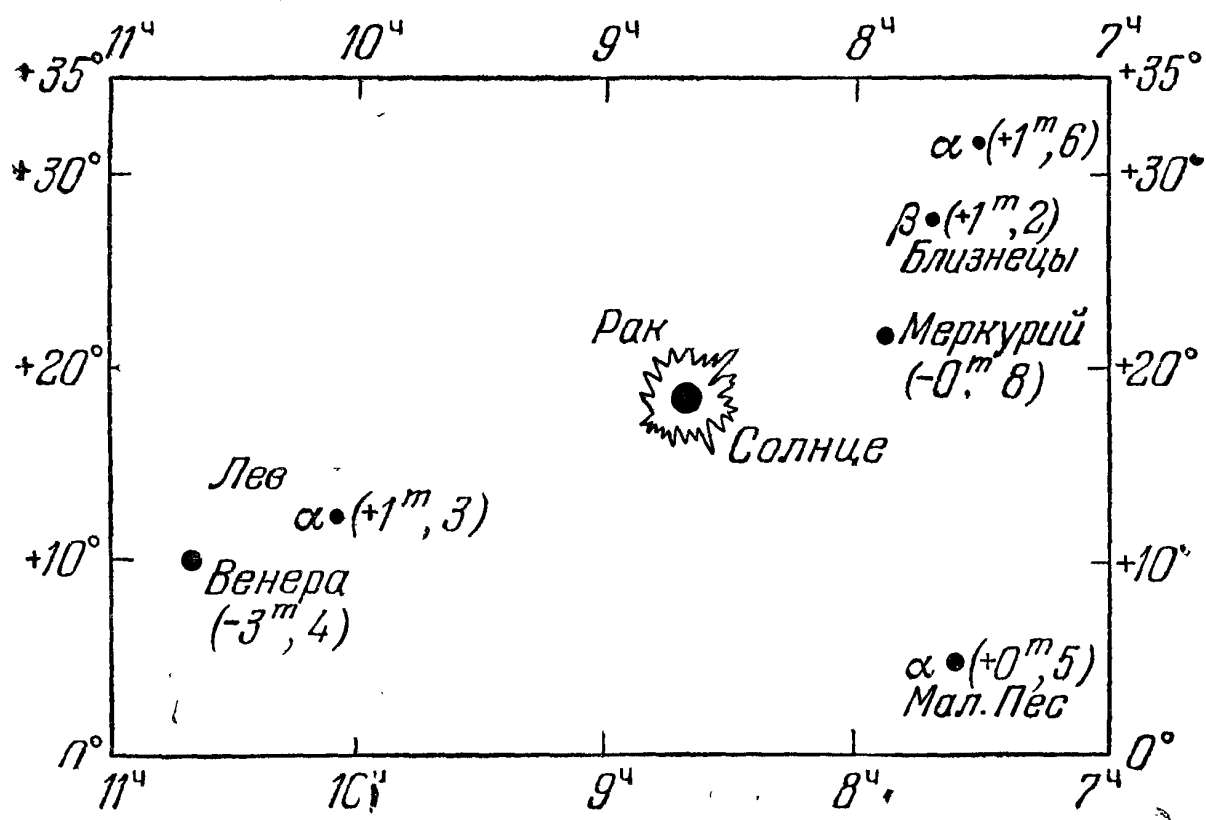


Рис. 49 Окрестности Солнца при его затмении 31 июля 1981 г.

и пройдет сквозь южную и частично центральную зону земной тени. Затмение будет очень продолжительным; длительность всех его теневых фаз составит $3^{\text{ч}}39^{\text{м}}$, а длительность полного затмения — $1^{\text{ч}}31^{\text{м}}$, при наибольшей фазе $\Phi_m = 1,46$. Но полное полутеневое затмение перед началом частного теневого (и после него) продлится всего лишь $3^{\text{м}}$ и его наибольшая фаза $\theta_m = 1,05$.

Все фазы этого затмения будут хорошо видны в Сибири, Казахстане, среднеазиатских республиках и на Дальнем Востоке, за исключением Чукотского полуострова, где Луна, после окончания полного затмения, будет заходить за горизонт в частных фазах. К западу от предельной линии, проходящей примерно от Красноводска, несколько западнее Оренбурга и Уфы, через Кожву и Печору к острову Новая Земля, Луна войдет в частном теновом затмении тем боль-

шей фазы, чем западнее расположена местность, но все остальные фазы будут видны до конца. Западнее же предельной линии, проходящей от Краснодара через Воронеж, Рязань, Ярославль и Вологду к Архангельску, можно видеть только полное теневое затмение и все последующие убывающие частные и полутеневые фазы.

В приводимых ниже обстоятельствах затмения приняты обозначения: T_m — момент по московскому

ОБСТОЯТЕЛЬСТВА ЗАТМЕНИЯ

	T_m	P	λ_v
Вступление Луны в полутень	16 ^ч 28 ^м ,3	99°,9	158° 02'
Начало частного теневого затмения	17 32,8	95,4	142 26
Начало полного теневого затмения	18 36,7	80,0	126 58
Момент наибольшей фазы	19 22,4	197,6	115 55
Конец полного теневого затмения	20 08,0	315,3	104 53
Конец частного теневого затмения	21 11,9	299,9	89 26
Выход Луны из полутени	22 16,4	295,4	73 50

Ход затмения

T_m	σ	Δ	Φ	θ	P
16 ^ч 28 ^м ,3	5429"	2,15	—	0,00	99°,9
16 59,2	4480	1,77	—	0,51	98,2
17 32,8	3466	1,37	0,00	1,05	95,4
18 09,2	2376	0,94	0,58	1,63	89,7
18 36,7	1592	0,63	1,00	2,05	80,0
19 09,2	840	0,33	1,40	2,45	46,6
19 22,4	736	0,29	1,46	2,50	197,6
19 39,2	901	0,36	1,37	2,42	342,4
20 08,0	1592	0,63	1,00	2,05	315,3
20 29,2	2194	0,87	0,68	1,73	307,3
21 11,9	3466	1,37	0,00	1,05	299,9
21 49,2	4602	1,82	—	0,44	296,9
22 16,4	5429	2,15	—	0,00	295,4

времени, P — позиционный угол радиуса Луны, направленного к центру земной тени, λ_v — географическая долгота меридиана, где Луна находится в верхней кульминации, σ — угловое расстояние между центрами лунного диска и контура земной тени, Δ — то же расстояние, выраженное в радиусах контура

земной тени, Φ — линейная фаза теневого затмения и θ — линейная фаза полутеневого затмения.

Чтобы узнать моменты этих явлений по принятому в данной местности времени, достаточно к указанным моментам прибавить разность между местным и московским временем.

Желающим самостоятельно вычислить обстоятельства затмения предлагаем дополнительные сведения: геоцентрическое противостояние Луны и Солнца по прямому восхождению произойдет 24 марта 1978 г. в $T_c = 19^h 29^m 58^s$ (по московскому времени) и для этого момента

	Солнце ☉	Луна ☾
прямое восхождение α	$0^h 13^m 29^s,4$	$12^h 13^m 29^s,4$
часовое изменение $\Delta\alpha$	$+9^s,09$	$+126^s,92$
склонение δ	$+1^\circ 27' 40''$	$-1^\circ 40' 32''$
часовое изменение $\Delta\delta$	$+59'',0$	$-622'',6$
угловой радиус r	$16' 02''$	$15' 37''$
горизонтальный экваториальный параллакс p_0	$8'',81$	$51' 18'',62$

Угловой радиус земной тени $r = 42' 09''$ и угловой радиус земной полутени $R = 74' 52''$.

Во время полного затмения 16 сентября 1978 г. Луна будет в созвездии Рыб, вблизи его границы с

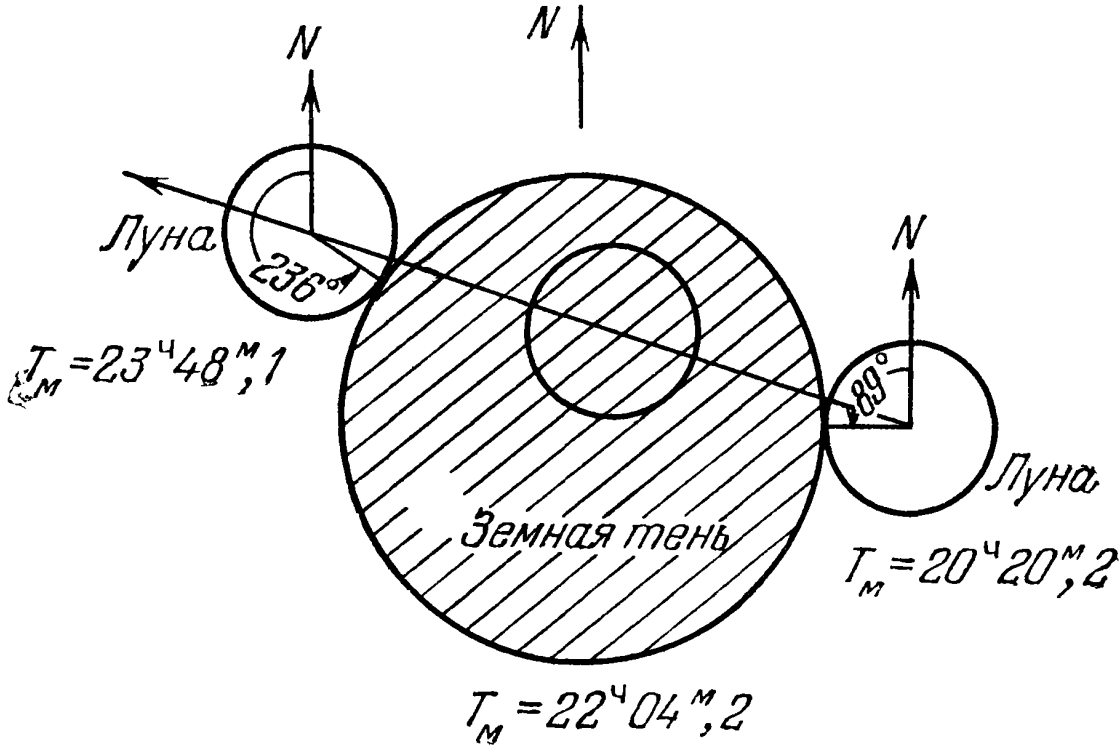


Рис. 50. Путь Луны сквозь земную тень 16 сентября 1978 г.

созвездием Водолея, и пройдет сквозь северную зону земной тени (рис. 50). Все теневое затмение продлится $3^h 28^m$, а полное — $1^h 20^m$. Наибольшая линейная

фаза полного теневого затмения $\Phi_m = 1,33$. Полное же полутеневое затмение, при фазе $\theta = 1,00$, наступит в момент начала погружения Луны в земную тень.

Это лунное затмение будет хорошо видно на всей территории СССР, кроме Чукотского полуострова. Все фазы теневого затмения доступны наблюдениям к западу от предельной линии, проходящей от Тетюхе-Пристани в Приморском крае через Хабаровск, Чумикан, Верхоянск и Намы к Тас-Тумусу на побережье моря Лаптевых. Восточнее этой линии полное

ОБСТОЯТЕЛЬСТВА ЗАТМЕНИЯ ПО МОСКОВСКОМУ ВРЕМЕНИ

	T_M	P	λ_B
Вступление Луны в полутень	19 ^ч 20 ^м ,7	83°,2	112° 00'
Начало частного теневого затмения	20 20,2	89,1	97 39
Начало полного теневого затмения	21 24,4	110,8	82 10
Момент наибольшей фазы	22 04,2	162,4	72 37
Конец полного теневого затмения	22 43,9	213,8	63 00
Конец частного теневого затмения	23 48,1	235,6	47 46
Выход Луны из полутени	24 47,6	241,5	33 08

Ход затмения

T_M	σ	Δ	Φ	θ	P
19 ^ч 20 ^м ,7	5601"	2,09	—	0,00	83°,2
19 59,2	4341	1,62	—	0,65	86,4
20 20,2	3654	1,36	0,00	1,00	89,1
20 59,2	2430	0,91	0,63	1,63	98,1
21 24,4	1704	0,64	1,00	2,00	110,8
21 39,2	1350	0,50	1,18	2,18	123,8
22 04,2	1057	0,40	1,33	2,33	162,4
22 29,2	1350	0,50	1,18	2,18	200,9
22 43,9	1704	0,64	1,00	2,00	213,8
23 19,2	2736	1,02	0,47	1,47	229,7
23 48,1	3654	1,36	0,00	1,00	235,6
24 09,2	4335	1,62	—	0,65	238,3
24 47,6	5601	2,09	—	0,00	241,5

затмение тоже видно, но Луна будет заходить за горизонт в фазах частного затмения. Восточнее же предельной линии, проходящей примерно от Магадана через Ягодный и Аллаиху к острову Фаддеевский, в

том числе и на Камчатском полуострове, Луна зайдет в полном затмении.

Западнее предельной линии, проходящей вблизи Сретенска, Олекминска, Сунтара и Вилюйска к устью реки Оленек, видны все фазы полутеневого и теневого затмения, но в крайних западных районах Украины и Белоруссии, в Калининградской области и почти на всей территории Литвы, Латвии и Эстонии Луна взойдет в полутеневом затмении, что не помешает наблюдать все фазы ее прохождения сквозь земную тень.

Предельные линии этого затмения показаны на рис. 33 (стр. 91).

Геоцентрическое противостояние Луны и Солнца по прямому восхождению произойдет 16 сентября 1978 г. в $T_c = 22^h 14^m 11^s$ (по московскому времени) и для этого момента

	Солнце ☉	Луна ☾
прямое восхождение α	$11^h 36^m 21^s,3$	$23^h 36^m 21^s,3$
часовое изменение $\Delta\alpha$	$+8^s,96$	$+137^s,35$
склонение δ	$+2^\circ 33' 24''$	$-2^\circ 14' 56''$
часовое изменение $\Delta\delta$	$-57'',9$	$+670'',0$
угловой радиус r	$15' 55''$	$16' 15''$
горизонтальный экваториальный параллакс p_0	$8'',74$	$59' 38'',19$

Угловой радиус земной тени $r = 44' 39''$ и угловой радиус земной полутени $R = 77' 06''$.

Очередное лунное затмение произойдет в ночь с 13 на 14 марта 1979 г. и будет частным, с наибольшей теневой фазой затмения $\Phi_m = 0,86$. Общая продолжительность затмения составит $3^h 18^m$. Оно будет видно на всей территории нашей страны, кроме Чукотского полуострова, но все теневые фазы затмения видимы только западнее предельной линии (окончания затмения при заходе Луны), проходящей примерно от Читы через Бодайбо, Нью и Сунтар к устью реки Оленек на побережье моря Лаптевых. Восточнее этой линии Луна будет заходить за горизонт в различных фазах затмения.

К началу частного затмения Луна полностью погрузится в земную полутень до фазы $\theta = 1,10$ и та-

кая же фаза полутеневого затмения будет в момент окончания частного затмения.

В середине затмения наивысшее положение над горизонтом Луна займет на географическом меридиане $\lambda_{\text{в}} = 45^{\circ}32'$, проходящем вблизи Еревана, Тбилиси, Грозного, Волгограда, Саратова, Горького и Котласа к Канину полуострову.

ОБСТОЯТЕЛЬСТВА ЗАТМЕНИЯ ПО МОСКОВСКОМУ ВРЕМЕНИ

		$T_{\text{м}}$	P	$\lambda_{\text{в}}$
Вступление Луны в полутень	13 марта	21 ^ч 10 ^м ,9	126°,8	88° 30'
Начало частного затмения		22 28,9	139,5	69 34
Середина затмения	14 марта	0 08,0	197,5	45 32
Конец частного затмения		1 47,2	255,6	21 28
Выход Луны из полутени		3 05,2	268,3	2 32

Ход затмения

$T_{\text{м}}$	σ	Δ	Φ	θ	P
21 ^ч 10 ^м ,9	5223"	2,21	—	0,00	126°,8
21 49,2	4230	1,79	—	0,56	131,5
22 28,9	3254	1,38	0,00	1,10	139,5
22 49,2	2790	1,18	0,26	1,36	145,6
23 09,2	2377	1,01	0,49	1,59	153,9
23 39,2	1900	0,81	0,76	1,86	172,5
0 08,0	1722	0,73	0,86	1,96	197,5
0 39,2	1928	0,82	0,74	1,84	224,3
1 09,2	2422	1,03	0,47	1,57	242,2
1 29,2	2842	1,20	0,23	1,33	250,2
1 47,2	3254	1,38	0,00	1,10	255,6
2 29,2	4293	1,82	—	0,52	263,9
3 05,2	5223	2,21	—	0,00	268,3

Луна пройдет сквозь северную зону земной тени и на протяжении почти всего затмения будет находиться в созвездии Льва, вблизи звезд τ и σ Льва и β Девы, а в конце затмения перейдет в созвездие Девы.

Геоцентрическое противостояние Луны и Солнца наступит 13 марта 1979 г. в $T_c = 23^h 48^m 30^s$ по московскому времени и для этого момента

	Солнце ☉	Луна ☾
прямое восхождение α	$23^h 33^m 06^s,7$	$11^h 33^m 06^s,7$
часовое изменение $\Delta\alpha$	$+9^s,17$	$+115^s,56$
склонение δ	$-2^\circ 54' 18''$	$+3^\circ 24' 24''$
часовое изменение $\Delta\delta$	$+59'',1$	$-562'',1$
угловой радиус r	$16' 05''$	$14' 53''$
горизонтальный экваториальный параллакс $p_\odot$	$8'',84$	$54' 36'',68$

Угловой радиус земной тени $r = 39' 21'' = 39',3$ и угловой радиус земной полутени $R = 72' 10'' = 72',2$.

Полное лунное затмение 6 сентября 1979 г., с наибольшей фазой $\Phi_m = 1,10$, будет видно в восточных областях Советского Союза, восточнее Улан-Удэ, а все фазы затмения — лишь на Дальнем Востоке, и за предельной линией начала частного затмения при восходе Луны. Эта линия проходит посередине между Хабаровском и Советской Гаванью, несколько западнее Николаевска-на-Амуре и Охотска, вблизи Усть-Неры и Аллайхи к западной акватории Восточно-Сибирского моря. К западу от нее Луна взойдет в частных возрастающих фазах затмения тем большей величины, чем дальше от линии расположена местность земной поверхности. На предельной линии, пролегающей несколько западнее Алдана, Якутска, Сангара и Верхоянска к Новосибирским островам, а также к западу от нее, Луна взойдет уже в полной фазе затмения, а западнее Улан-Удэ, Баргузина, Витима и Суханы можно видеть лишь убывающие фазы частного затмения. Предельная линия окончания частного затмения при восходе Луны проходит вблизи Кызыла и Красноярска через Байкит и Хатангу к полуострову Таймыру, и поэтому западнее этой линии лунного затмения не будет видно, так как там Луна взойдет уже после его окончания.

К началу частного затмения Луна не полностью погрузится в полутень Земли, а лишь до фазы $\theta = 0,97$ и такая же фаза полутеневого затмения будет при выходе Луны из земной тени.

В середине полного затмения Луна займет наивысшее положение над горизонтом местностей с географической долготой $\lambda_{\text{в}} = 196^{\circ} 12'$. Этот географический меридиан проходит вне территории Советского Союза.

На протяжении всего затмения Луна будет находиться в созвездии Водолея, вблизи его звезд λ и ϕ и пройдет сквозь южную зону земной тени.

ОБСТОЯТЕЛЬСТВА ЗАТМЕНИЯ ПО МОСКОВСКОМУ ВРЕМЕНИ

	$T_{\text{м}}$	P	$\lambda_{\text{в}}$
Вступление Луны в полутень Земли	11 ^ч 20 ^м ,2	57°,1	233 ^ч 14'
Начало частного затмения	12 17,9	48,4	219 17
Начало полного затмения	13 31,3	10,4	201 44
Середина затмения	13 54,2	343,1	196 12
Конец полного затмения	14 17,1	315,7	190 40
Конец частного затмения	15 30,5	277,2	173 02
Выход Луны из полутени Земли	16 28,2	270,0	159 10

Ход затмения

$T_{\text{м}}$	σ	Δ	Φ	θ	P
11 ^ч 20 ^м ,2	5735''	2,06	—	0,00	57°,1
11 59,2	4410	1,58	—	0,66	52,0
12 17,9	3793	1,36	0,00	0,97	48,4
12 39,2	3117	1,12	0,34	1,30	42,5
12 59,2	2528	0,91	0,63	1,60	34,2
13 19,2	2021	0,72	0,88	1,85	21,4
13 31,3	1785	0,64	1,00	1,97	10,4
13 54,2	1586	0,57	1,10	2,07	343,1
14 17,1	1785	0,64	1,00	1,97	315,7
14 29,2	2021	0,72	0,88	1,85	304,8
14 49,2	2527	0,91	0,63	1,60	292,0
15 09,2	3116	1,12	0,34	1,30	283,7
15 30,5	3793	1,36	0,00	0,97	277,2
15 49,2	4409	1,58	—	0,66	274,2
16 28,2	5735	2,06	—	0,00	270,0

Геоцентрическое противостояние Луны и Солнца произойдет 6 сентября 1979 г. в момент $T_c = 13^h 40^m 43^s$ по московскому времени и для этого момента

		Солнце ☉	Луна ☾
прямое восхождение	α	$10^h 58^m 15^s,1$	$22^h 58^m 15^s,1$
часовое изменение	$\Delta\alpha$	$+9^s,01$	$+146^s,98$
склонение	δ	$+6^\circ 34' 59''$	$-7^\circ 02' 37''$
часовое изменение	$\Delta\delta$	$-55'',8$	$+680'',1$
угловой радиус	r	$15' 52''$	$16' 41''$
горизонтальный экваториальный параллакс	p_0	$8'',72$	$61' 23'',81$

Угловой радиус земной тени $r = 46' 29'' = 46',5$ и угловой радиус земной полутени $R = 78' 51'' = 78',9$.

Сравнительно подробные сведения о всех предстоящих солнечных и лунных затмениях ежегодно публикуются в Астрономическом календаре-ежегоднике ВАГО, а краткие сведения о тех же затмениях — в Школьном астрономическом календаре.

Перечень предстоящих центральных солнечных затмений и полных лунных затмений до конца XX века приведен в таблицах 4 и 5, на стр. 203 и 204.

В начале стр. 69 было упомянуто о покрытиях Лунной звезд и планет. Вполне понятно, что Луна покрывает только звезды зодиакальных созвездий, по которым проходит лунный путь, и так как планеты перемещаются тоже по зодиакальным созвездиям, то и они время от времени покрываются Луной. Число ярких звезд несравненно меньше числа слабых звезд, а ярких планет — всего пять, и поэтому покрытия Лунной ярких объектов происходят значительно реже покрытий слабых звезд.

Особенно редки покрытия ярких звезд и планет во время лунных затмений, когда эти объекты заслоняются затмившейся Луной: ведь для этого необходимо, чтобы они вместе с Луной находились и в противостоянии с Солнцем, и вблизи лунного узла, а такие совпадения в высшей степени уникальны. К тому же из пяти ярких планет, видимых невооруженным глазом, только три — Марс, Юпитер и Сатурн — могут находиться в противостоянии с Солнцем, так как движутся за орбитой Земли, а расположенные ближе

Земли к Солнцу Меркурий и Венера в противостоянии с ним никогда не бывают.

И тем не менее даже исключительно редкие явления покрытий ярких звезд и планет затмившейся Луной все же происходят, но, конечно, видны не со всего ночного полушария Земли, а лишь из некоторых его местностей. Так, во время полного лунного затмения 9 января 1982 г. произойдет покрытие Луной звезды δ Близнецов ($3^m,5$), а во время полного лунного затмения 4 мая 1985 г. — покрытие звезды α Весов ($2^m,9$).

Очередные же покрытия планет Луной во время полных лунных затмений произойдут не скоро: Сатурна — 26 июля 2344 г., Марса — 26 апреля 2488 г. и Юпитера — 10 июня 2932 г. Кстати, и ближайшее покрытие яркой звезды α Льва ($1^m,3$) затмившейся Луной наступит лишь 22 февраля 2445 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

Α, α — альфа	Ι, ι — йота	Ρ, ρ — ро
Β, β — бета	Κ, κ — каппа	Σ, σ, ς — сигма
Γ, γ — гамма	Λ, λ — лямбда	Τ, τ — тау
Δ, δ — дельта	Μ, μ — мю	Υ, υ — ипсилон
Ε, ε — эпсилон	Ν, ν — ню	Φ, φ — фи
Ζ, ζ — дзета	Ξ, ξ — кси	Χ, χ — хи
Η, η — эта	Ο, ο — омикрон	Ψ, ψ — пси
Θ, θ, ϑ — тэта	Π, π — пи	Ω, ω — омега

Т а б л и ц а 1

Связь угловых единиц с единицами времени

°	ч	м	°	ч	м	'	м	с	'	м	с	"	с	"	с
1	0	04	60	4	00	1	0	04	16	1	04	1	0,07	16	1,07
2	0	08	70	4	40	2	0	08	17	1	08	2	0,13	17	1,13
3	0	12	80	5	20	3	0	12	18	1	12	3	0,20	18	1,20
4	0	16	90	6	00	4	0	16	19	1	16	4	0,27	19	1,27
5	0	20	100	6	40	5	0	20	20	1	20	5	0,33	20	1,33
6	0	24	120	8	00	6	0	24	21	1	24	6	0,40	21	1,40
7	0	28	150	10	00	7	0	28	22	1	28	7	0,47	22	1,47
8	0	32	180	12	00	8	0	32	23	1	32	8	0,53	23	1,53
9	0	36	200	13	20	9	0	36	24	1	36	9	0,60	24	1,60
10	0	40	210	14	00	10	0	40	25	1	40	10	0,67	25	1,67
15	1	00	250	16	40	11	0	44	26	1	44	11	0,73	26	1,73
20	1	20	270	18	00	12	0	48	27	1	48	12	0,80	27	1,80
30	2	00	300	20	00	13	0	52	28	1	52	13	0,87	28	1,87
40	2	40	330	22	00	14	0	56	29	1	56	14	0,93	39	1,93
50	3	20	360	24	00	15	1	00	30	2	00	15	1,00	30	2,00

Таблица 2

Связь единиц времени с угловыми единицами

Часы		Мин		Мин	°	'	Сек	'	"	Сек	'	"
1	15	1	0 15	16	4	00	1	0 15	16	4	00	
2	30	2	30	17	4	15	2	30	17	4	15	
3	45	3	45	18	4	30	3	45	18	4	30	
4	60	4	1 00	19	4	45	4	1 00	19	4	45	
5	75	5	1 15	20	5	00	5	1 15	20	5	00	
6	90	6	1 30	21	5	15	6	1 30	21	5	15	
7	105	7	1 45	22	5	30	7	1 45	22	5	30	
8	120	8	2 00	23	5	45	8	2 00	23	5	45	
9	135	9	2 15	24	6	00	9	2 15	24	6	00	
10	150	10	2 30	25	6	15	10	2 30	25	6	15	
11	165	11	2 45	26	6	30	11	2 45	26	6	30	
12	180	12	3 00	27	6	45	12	3 00	27	6	45	
13	195	13	3 15	28	7	00	13	3 15	28	7	00	
14	210	14	3 30	29	7	15	14	3 30	29	7	15	
15	225	15	3 45	30	7	30	15	3 45	30	7	30	

Таблица 3

Перевод интервалов ΔS звездного времени
в интервалы ΔT среднего времени и обратно

$\Delta S \rightarrow \Delta T$				$\Delta S \rightarrow \Delta T$				$\Delta T \rightarrow \Delta S$				$\Delta T \rightarrow \Delta S$			
ч	ч	м	с	м	м	с		ч	ч	м	с	м	м	с	
1	0	59	50,2	1	0	59,8		1	1	0	09,9	1	1	0,2	
2	1	59	40,3	2	1	59,7		2	2	0	19,7	2	2	0,3	
3	2	59	30,5	3	2	59,5		3	3	0	29,6	3	3	0,5	
4	3	59	20,7	4	3	59,3		4	4	0	39,4	4	4	0,7	
5	4	59	10,8	5	4	59,2		5	5	0	49,3	5	5	0,8	
6	5	59	01,0	6	5	59,0		6	6	0	59,1	6	6	1,0	
7	6	58	51,2	7	6	58,8		7	7	1	09,0	7	7	1,2	
8	7	58	41,4	8	7	58,7		8	8	1	18,8	8	8	1,3	
9	8	58	31,5	9	8	58,5		9	9	1	28,7	9	9	1,5	
10	9	58	21,7	10	9	58,4		10	10	1	38,6	10	10	1,6	
11	10	58	11,9	20	19	56,7		11	11	1	48,4	20	20	3,3	
12	11	58	02,0	30	29	55,1		12	12	1	58,3	30	30	4,9	
13	12	57	52,2	40	39	53,4		13	13	2	08,1	40	40	6,6	
14	13	57	42,4	50	49	51,8		14	14	2	18,0	50	50	8,2	
15	14	57	32,6	60	59	50,2		15	15	2	27,8	60	60	9,9	
16	15	57	22,7					16	16	2	37,7				
17	16	57	12,9	с	с			17	17	2	47,6	с	с		
18	17	57	03,1	10	10,0			18	18	2	57,4	10	10,0		
19	18	56	53,2	20	19,9			19	19	3	07,3	20	20,1		
20	19	56	43,4	30	29,9			20	20	3	17,1	30	30,1		
21	20	56	33,6	40	39,9			21	21	3	27,0	40	40,1		
22	21	56	23,8	50	49,9			22	22	3	36,8	50	50,1		
23	22	56	13,9	60	59,8			23	23	3	46,7	60	60,2		
24	23	56	04,1					24	24	3	56,6				

**Полные (П) и кольцеобразные (К)
солнечные затмения до конца XX века**

Дата	Вид	Область видимости
26 февраля 1979 г.	П	Северная Америка, Тихий, Атлантический и Северный Ледовитый океаны
22 августа 1979 г.	К	Антарктида, Тихий и Атлантический океаны
16 февраля 1980 г.	П	Африка, Индия, Атлантический и Индийский океаны
10 августа 1980 г.	К	Южная и Центральная Америка, восточная зона Тихого океана
4 февраля 1981 г.	К	Южная зона Тихого океана
31 июля 1981 г.	П	Грузия, Северный Кавказ, Казахстан, Сибирь, Дальний Восток, Тихий океан
11 июня 1983 г.	П	Тихий океан, Ява
4 декабря 1983 г.	К	Атлантический океан, Центральная Африка
30 мая 1984 г.	К	Центральная Америка, Атлантический океан, Северо-Западная Африка
22 ноября 1984 г.	П	Новая Гвинея, Индонезия, Тихий океан
12 ноября 1985 г.	П	Антарктика
3 октября 1986 г.	П	Гренландия, Северный Ледовитый океан
29 марта 1987 г.	П	Атлантический океан, Экваториальная Африка
23 сентября 1987 г.	К	Азия, Тихий океан
18 марта 1988 г.	П	Индийский и Тихий океаны, Суматра,
10 сентября 1988 г.	К	Южная Америка, Атлантический океан, Африка
26 января 1990 г.	К	Южная зона Тихого океана, Аргентина, южная зона Атлантического океана
22 июля 1990 г.	П	Финляндия, Арктика, Северо-восточные районы Сибири
15 января 1991 г.	К	Тихий океан
11 июля 1991 г.	П	Тихий океан, Гавайские острова, Центральная Америка
4 января 1992 г.	К	Центральная зона Тихого океана
30 июня 1992 г.	П	Южная зона Атлантического океана
10 мая 1994 г.	К	Тихий океан, Северная Америка, Атлантический океан
3 ноября 1994 г.	П	Тихий океан, Южная Америка
29 апреля 1995 г.	К	Тихий океан, Южная Америка

Дата	Вид	Область видимости
24 октября 1995 г.	П	Тихий и Индийский океаны
9 марта 1997 г.	П	Восточные районы Сибири
2 сентября 1997 г.	К	Южная зона Атлантического океана и Антарктида
26 февраля 1998 г.	П	Тихий и Атлантический океаны, Центральная Америка
22 августа 1998 г.	К	Индийский океан, Австралия, юго-западная зона Тихого океана
16 февраля 1999 г.	К	Индийский океан, Индонезия
11 августа 1999 г.	П	Западная Европа, Иран, Индия

Таблица 5

Полные лунные затмения до конца XX века

T_2 — момент начала и T_3 — момент окончания полной фазы затмения по московскому времени; λ_v — географическая долгота меридиана, на котором в середине затмения Луна будет находиться в верхней кульминации.

Дата	T_2	T_3	λ_v	Районы видимости в СССР
24 марта 1978 г.	18 ^ч ,6	20 ^ч ,1	116°	Кроме западных районов
16 сентября 1978 г.	21,4	22,7	73	Кроме Чукотского п-ва
6 сентября 1979 г.	13,5	14,3	196	Восточные районы
9 января 1982 г.	22,2	23,6	63	Кроме Чукотки и Камчатки
6 июля 1982 г.	9,6	11,3	248	Чукотский полуостров
30 декабря 1982 г.	13,9	15,0	189	Восточная половина СССР
4 мая 1985 г.	22,4	23,5	60	Кроме Чукотки и Камчатки
28 октября 1985 г.	20,4	21,1	90	Вся территория страны
24 апреля 1986 г.	15,2	16,3	168	Восточная половина СССР
17 октября 1986 г.	21,7	22,9	67	Кроме Чукотки и Камчатки
20 февраля 1989 г.	18,0	19,3	129	Кроме западных районов
17 августа 1989 г.	5,2	6,9	315	Не видно
9 февраля 1990 г.	21,8	22,6	76	Кроме Чукотского п-ва
10 декабря 1992 г.	2,1	3,3	3	Западная половина СССР
4 июня 1993 г.	15,2	16,8	165	Восточная половина СССР
29 ноября 1993 г.	9,0	9,8	261	Не видно
4 апреля 1996 г.	2,4	3,8	359	Западные районы страны
27 сентября 1996 г.	5,3	6,5	314	Не видно
16 сентября 1997 г.	21,2	22,3	77	Кроме Чукотского п-ва
16 июля 2000 г.	17,4	19,1	130	Кроме западных районов

ЛИТЕРАТУРА

1. Селешников С. И., История календаря и хронология, «Наука», 1970 и 1977.
2. Сборник «Солнечные затмения и их наблюдения», Физматгиз, 1960.
3. Пикельнер С. Б., Солнце, Физматгиз, 1961.
4. Рябов Ю. А., Движения небесных тел, изд. 3-е, «Наука», 1978.
5. Демин В. Г., Судьба Солнечной системы, изд. 2-е, «Наука», 1975.
6. Дагаев М. М., Наблюдения звездного неба, изд. 3-е, «Наука», 1976.
7. Зигель Ф. Ю., Сокровища звездного неба, изд. 3-е, «Наука», 1975.
8. Рей Г., Звезды, «Мир», 1969.
9. Сытинская Н. Н., Луна и ее наблюдение, Гостехиздат, 1956.
10. Куликов К. А., Гуревич В. Б., Новый облик старой Луны, «Наука», 1974.
11. Новиков Э. А., Планета загадок, «Недра», 1974.
12. Агекян Т. А., Звезды, галактики, Метагалактика, «Наука», 1973.
13. Каплан С. А., Физика звезд, изд. 3-е, «Наука», 1977.
14. Ефремов Ю. Н., В глубины Вселенной, изд. 2-е, «Наука», 1977.
15. Цесевич В. П., Что и как наблюдать на небе, изд. 4-е, «Наука», 1973.
16. Цесевич В. П., Переменные звезды и способы их исследования, «Педагогика», 1970.
17. Куликовский П. Г., Справочник любителя астрономии, изд. 4-е, «Наука», 1971.
18. Астрономический календарь. Постоянная часть, изд. 6-е, «Наука», 1973.
19. Михайлов А. А., Звездный атлас, четыре карты звездного неба, изд. 4-е, «Наука», 1965.
20. Михайлов А. А., Атлас звездного неба, 20 карт со звездами до 6,5 величины, «Наука», 1974.
21. Михайлов А. А., Звездный атлас, со звездами до 8,25 звездной величины, изд. 3-е, «Наука», 1969.

22. Михайлов А. А., Теория затмений, «Гостехиздат», 1954.
23. Климишин И. А., Астрономия наших дней, «Наука», 1976.
24. Астрономический календарь-ежегодник, переменная часть (выходит ежегодно на очередной календарный год в издательстве «Наука»).
25. Школьный астрономический календарь (выходит ежегодно на очередной учебный год в издательстве «Просвещение»).
26. Астрономический ежегодник СССР (выходит ежегодно на календарный год в издательстве «Наука»).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. Затмения и суеверия	13
2. Видимое годовое движение Солнца и орбита Земли	31
3. Движение Луны и ее фазы	47
4. Причины и условия видимости солнечных за- тмений	69
5. Причины и условия наступления лунных за- тмений	86
6. Периодичность солнечных и лунных затмений	95
7. Простейшие наблюдения лунных затмений .	101
8. Простейшие наблюдения солнечных затмений	111
9. Некоторые сведения из астрометрии . . .	117
10. Вычисления обстоятельств солнечных затме- ний	139
11. Предвычисление лунных затмений	168
12. Ближайшие солнечные и лунные затмения .	183
Приложения	201
Литература	205

Михаил Михайлович Дагаев

СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

М., 1978 г., 208 стр. с илл.

Редактор *И. Е. Рахлин*

Техн. редактор *Н. В. Кошелева*

Корректоры *Е. А. Белицкая, Н. Д. Дорохова*

ИБ № 2468

Сдано в набор 10.11.77. Подписано к печати 29.03.78. Т-06590.
Бумага 84×108¹/₃₂, тип. № 1. Литературная гарнитура. Высокая
печать. Условн. печ. л. 10,92. Уч-изд. л. 10,3. Тираж 100 000 экз.
Заказ № 837. Цена книги 35 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном
комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
198052, Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29

Михаил Михайлович Дагаев

СОЛНЕЧНЫЕ И ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ

М., 1978 г., 208 стр. с илл.

Редактор *И. Е. Рахлин*

Техн. редактор *Н. В. Кошелева*

Корректоры *Е. А. Белицкая, Н. Д. Дорохова*

ИБ № 2468

Сдано в набор 10.11.77. Подписано к печати 29.03.78. Т-06590.
Бумага 84×108¹/₃₂, тип. № 1. Литературная гарнитура. Высокая
печать. Условн. печ. л. 10,92. Уч-изд. л. 10,3. Тираж 100 000 экз.
Заказ № 837. Цена книги 35 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном
комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
198052, Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29

526

Д14

УДК 521.82

Д $\frac{20604-066}{053(02)-78}$ 193-78

© Главная редакция
физико-математической литературы
издательства «Наука», 1978